



Contribution à la gestion de la personnalisation de masse

Clément Chatras

► To cite this version:

Clément Chatras. Contribution à la gestion de la personnalisation de masse. Gestion et management. Université Paris sciences et lettres, 2016. Français. NNT : 2016PSLED002 . tel-01329138

HAL Id: tel-01329138

<https://theses.hal.science/tel-01329138>

Submitted on 8 Jun 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE DE DOCTORAT
de l'Université de recherche
Paris Sciences et Lettres –
PSL Research University

préparée à l'Université
Paris – Dauphine

Contribution à la gestion de la
personnalisation de masse.

par Clément CHATRAS.

Ecole doctorale n°543
Spécialité : Sciences
De gestion
Soutenue le 01.04.2016

Composition du Jury :

M. Emmanuel CAILLAUD
Université de Strasbourg
Membre du jury

M. Stéphane COGNEE
Renault SAS
Membre du jury

M. Frédéric GAUTIER
IAE de Paris
Président du jury

M. Vincent GIARD
Université Paris-Dauphine
Directeur de thèse

M. Pierre FENIES
Université Paris Ouest Nanterre
La Défense
Rapporteur

M. Yannick FREIN
Ecole d'ingénieur INP Grenoble
Rapporteur

M. Benoît MONTREUIL
Georgia Institute of Technology
Membre du jury

« L'université n'entend donner aucune approbation
ou improbation aux opinions émises dans les thèses : ces opinions doivent être considérées
comme propres à l'auteur »

Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à cette thèse en acceptant de l'évaluer et de participer à ma soutenance de doctorat.

Je remercie tout particulièrement mon Directeur de thèse, Vincent Giard, pour son aide précieuse, son soutien actif et ses remarques constructives. Grâce à sa rigueur, son expérience et sa générosité, j'ai beaucoup appris à ses côtés durant ces trois années de thèse.

Je souhaite aussi remercier le laboratoire LAMSADE de m'avoir accueilli bien que principalement en entreprise. Je suis particulièrement reconnaissant d'avoir eu la chance de rendre visible et de défendre nos travaux dans de nombreuses conférences à travers le monde.

Je remercie l'entreprise Renault et l'ANRT (Association Nationale de la Recherche et de la Technologie) d'avoir supporté financièrement la réalisation de ces travaux de recherche sous convention CIFRE.

Je tiens à remercier Stéphane Cognée, Responsable du service Documentation et projet Véhicules et Organes (DVO) à la Direction de la Supply Chain Alliance de Renault-Nissan. J'ai apprécié sa confiance, sa grande connaissance des processus Renault autant que son accessibilité et son ouverture d'esprit.

Je remercie également chaleureusement tous les collègues avec qui j'ai eu la chance d'échanger tout au long de ces trois années au sein du Groupe Renault. En premier lieu, mes remerciements vont aux membres du service DVO pour leur accueil, leur disponibilité et leur écoute. Je garderai un excellent souvenir de ces trois années passées avec eux.

Je tiens aussi à remercier l'ensemble de mes proches pour leur soutien infaillible et leur flexibilité dans ces trois années aussi riches qu'intenses qui ne m'ont pas toujours permis d'être disponible à leurs côtés.

Je remercie profondément mes parents et ma sœur qui ont toujours cru en moi et qui m'ont permis de faire des études passionnantes. Leur soutien a été des plus précieux pour moi.

Enfin et surtout, mes remerciements vont à Marie, ma femme, ma moitié, qui par son soutien inaltérable, son infinie patience et son amour, m'a aidé à mener à bien ce projet. Je lui dédie ce travail.

Table des matières

Remerciements	V
Table des matières	VII
Liste des tableaux	XIII
Liste des figures	XV
Abréviations	XVII
Introduction Générale.....	19

Partie I. L'industrie automobile face à sa diversité : la personnalisation de masse 29

Introduction de la Partie I.....	31
Chapitre 1. Cadre de recherche et problématique.....	33
1. Présentation du cadre de la recherche et définition des objectifs	33
1.1. <i>Cadre de la recherche</i>	33
1.1.1. Cadre universitaire	33
1.1.2. Cadre Renault	34
1.2. <i>Objectif de la recherche</i>	35
2. Problématique de la gestion de la diversité dans un contexte de personnalisation de masse.....	36
3. Organisation du travail de recherche.....	39
3.1. <i>Instance de contrôle et macroplanning du projet de thèse</i>	39
3.2. <i>Méthodologie d'analyse de la littérature</i>	40
Chapitre 2. Etude de la diversité automobile	43
1. Une diversité contingente.....	43
1.1. <i>Concept de diversité</i>	43
1.2. <i>Mise en évidence inductive de l'importance du point de vue</i>	44
1.3. <i>Positionnement général choisi</i>	48
2. État de la diversité dans le secteur automobile.....	52

2.1. <i>De la diversité de produits finis</i>	52
2.1.1. Structuration de la diversité commerciale	52
2.1.2. Evolution de la diversité offerte	53
2.1.3. État de la diversité de produits finis	55
2.1.4. Diversité offerte versus diversité produite.....	60
2.2. ... <i>À la diversité de composants</i>	64
2.2.1. Structuration de la diversité technique	64
2.2.2. État de la diversité de composants.....	65
2.2.3. Difficultés particulières de la diversité technique automobile.....	67
Conclusion de la Partie I	69

Partie II. Représentation de la diversité : structuration des nomenclatures	71
--	-----------

Introduction de la Partie II	73
---	-----------

Chapitre 3. Revue de littérature	75
---	-----------

1. Nomenclature Modulaire.....	76
2. Nomenclature Générique.....	80

Chapitre 4. Les Nomenclatures chez Renault : la Documentation	85
--	-----------

1. Macrostructure de la Documentation Renault.....	86
1.1. <i>De la nécessité d'utiliser deux langages</i>	86
1.2. <i>Synchronisation des deux langages</i>	87
1.2.1. Macro-processus de synchronisation des deux Documentations lors de la conception d'une famille de produits.....	88
1.2.2. Macro-Processus de traduction de la Documentation Commerciale en Documentation Technique en phase de production	93
2. Documentation Technique	95
2.1. <i>De la nécessité d'un découpage de la Documentation Technique</i>	96
2.2. <i>La Documentation Technique de conception</i>	97
2.3. <i>La Documentation Technique de production</i>	100
3. Documentation Commerciale.....	101
3.1. <i>Modélisation de la Documentation Commerciale de Renault</i>	101
3.2. <i>Mécanisme de détermination de la Documentation Technique par la Documentation Commerciale</i>	105

Chapitre 5. Impacts sur la planification 111

- 1. Positionnement du problème de construction des PDPs en production de masse de produits fortement diversifiés..... 111
- 2. Détermination du PDP au niveau 1 de la nomenclature..... 117
 - 2.1. *Cas 1 - Coefficients de nomenclature d'un ECA calculés à partir de ceux d'EPAs 117*
 - 2.2. *Cas 2 - Calcul des coefficients de nomenclature d'un ECA à partir de son historique 119*
- 3. Détermination du PDP au niveau 0 de la nomenclature..... 120

Conclusion de la Partie II 129

Partie III. Simplification de la diversité : Architecture modulaire 133
--

Introduction de la partie III 135

Chapitre 6. Revue de littérature 137

- 1. La Modularité de produits 139
 - 1.1. *Différentes approches de modularité de produits 139*
 - 1.2. *Définition d'un module 140*
 - 1.2.1. Une approche d'abord fonctionnelle 141
 - 1.2.2. Complétée par la définition d'interfaces 141
 - 1.3. *Architecture modulaire 143*
 - 1.3.1. Processus de conception 143
 - 1.3.2. Architecture modulaire 145
 - 1.3.3. Avantages et inconvénients de l'architecture modulaire 150
- 2. La modularité de produits et la modularité organisationnelle 153
 - 2.1. *Organisation modulaire intra-firme 154*
 - 2.1.1. Organisation modulaire du processus de conception..... 155
 - 2.1.2. Organisation modulaire de la production 157
 - 2.2. *Organisation modulaire inter-firmes 157*
 - 2.2.1. Relations verticales inter-firmes..... 157
 - 2.2.2. Relations horizontales inter-firmes..... 161

Chapitre 7. La modularité de Renault 163

- 1. La situation avant la mise en place d'une démarche modulaire 164
 - 1.1. *Organisation des processus de conception par famille 164*
 - 1.2. *De la préexistence d'une forme de « modularité » 166*

2. Attentes et définition de la modularité de Renault	167
2.1. Les attentes de la « Conception Modulaire »	167
2.2. Définition d'un module pour Renault	169
2.3. L'absence d'architecture modulaire	171
3. Organisation du processus de conception Renault	173
3.1. Un processus de conception des modules transversal	173
3.2. Une définition des modules contingente à l'organisation du Département R&D	175
Chapitre 8. Analyse de la mise en place de la modularité	177
1. Les conditions de réussite d'une modularité de produits	177
1.1. La définition d'une architecture modulaire claire	177
1.1.1. Le découpage fonctionnel : une question de granularité	177
1.1.2. La définition d'interface standard : une question au cœur des enjeux organisationnels	180
1.1.3. La prise en compte de l'existant	181
1.2. L'organisation de la Direction de la R&D doit être compatible	182
1.2.1. Une équipe d'architectes systèmes forte	182
1.2.2. La constitution de groupe projet par module	183
2. Vers une modularité organisationnelle inter-firmes	184
2.1. La modularité de produits facilite une modularité organisationnelle	184
2.2. De la modularité organisationnelle à l'externalisation	185
2.3. Rapports inter-firmes dans la Chaîne Logistique automobile	186
Conclusion de la Partie III	189

Partie IV. Réduction de la diversité : la standardisation..... 191

Introduction de la Partie IV	193
Chapitre 9. Revue de littérature	195
1. Les approches descriptives de standardisation	195
2. Les approches prescriptives de standardisation	196
2.1. Deux types d'approches prescriptives	196
2.2. Description des principales approches prescriptives de standardisation de composants	197
2.3. Différences d'hypothèse entre ces approches	201

Chapitre 10. Standardisation simultanée des modules et de leurs composants.....	205
1. Description du modèle d'optimisation	205
1.1. Description du problème décisionnel	205
1.2. Le modèle de base	207
2. Amélioration de la définition de la fonction objectif	211
2.1. Composantes temporelles et spatiales	212
2.1.1. Dimension temporelle	212
2.1.2. Dimension spatiale	215
2.2. Prise en compte de la non-linéarité de certains coûts de la fonction objectif.....	216
2.3. Prise en compte de contraintes additionnelles	218
2.3.1. Prise en compte de synergies de production dans la fonction objectif	218
2.3.2. Prise en compte de contraintes spécifiques	219
3. Récapitulatif des notations utilisées	220
Chapitre 11. Implémentation sur un exemple réel.....	225
1. Description du cas industriel	225
1.1. Description du système	225
1.2. Choix de la fonction objectif.....	228
2. Implémentation et résultats	229
2.1. Définition fonctionnelle et technique des Besoins, MAs et CAs	229
2.1.1. Définition fonctionnelle des besoins	229
2.1.2. Définition technique des Modules Alternatifs	230
2.1.3. Définition technique des Composants alternatifs	231
2.2. Construction des matrices de paramètres	232
2.3. Présentation des résultats.....	232
3. Problèmes pratiques de mise en œuvre de cette approche de standardisation.....	234
Conclusion de la Partie IV.....	239
Conclusion Générale	241
Bibliographie.....	245
Annexes	259

Liste des tableaux

Tableau 1 : Macro planning de la thèse.....	40
Tableau 2 : Exemples illustrant la multiplicité des définitions de la diversité en automobile	45
Tableau 3: Évolution des segments commerciaux automobiles en Europe depuis 60 ans	54
Tableau 4 : Illustrations des restrictions de combinaisons entre deux items dans le configurateur français de la Twingo.....	57
Tableau 5 : Illustration des restrictions de combinaisons entre deux items dans le configurateur allemand de la Twingo.....	58
Tableau 6 : Diversités commerciales versus volumes de ventes sur le marché automobile européen en 2002.....	61
Tableau 7: Synthèse de l'analyse de la littérature.....	83
Tableaux 8 : Exemple d'une détermination de CAs (alternateurs) à partir de PAs (motorisation et climatisation).....	107
Tableau 9 : Typologie des problèmes d'établissement du PDP d'un composant de niveau 1	115
Tableau 10 : Détermination des alternateurs à partir des prestations de motorisation et de climatisation	115
Tableau 11 : Détermination des coefficients de nomenclature des alternateurs à partir des prestations motorisation et climatisation	116
Tableau 12 : Exemple numérique de détermination des coefficients de nomenclature des alternateurs à partir de ceux des prestations motorisation et climatisation avec critère de minimisation	119
Tableau 13 : Exemple numérique de détermination des coefficients de nomenclature associés à une combinaison de trois PAs appartenant respectivement aux EPA MOtorisation, CLimatisation et Région Commerciale	123
Tableaux 14 : Matrice de calcul des coefficients de nomenclature associés à des combinaisons entre les PAs du Méta-EPA principal et les PAs des Méta-EPAs secondaires.....	126
Tableaux 15 : Exemple de définition fonctionnelle de 10 MAs, 14 besoins et la matrice de Booléens résultant du croisement de ces définitions.....	200
Tableau 16 : Synthèse de l'analyse de littérature	204
Tableau 17 : Illustration de la démarche d'utilisation des demandes actualisées dans la détermination des coefficients de la fonction objectif.....	214

Tableau 18 : Illustration de la prise en compte de la segmentation temporelle des demandes, liée à l'arrivée de nouveaux MAS	215
--	-----

Liste des figures

Figure 1 : Définition de la diversité par un groupe d'observateurs	44
Figure 2 : Les quatre activités macroscopiques de gestion de la diversité externe et interne	49
Figure 3 : La diversité : un concept à trois dimensions	51
Figure 4 : Évolution dans le temps de la diversité dans la gamme.....	55
Figure 5 : Répartition de la production de Twingo en 2013 en fonction des combinaisons Motorisation/Niveau d'équipement et du pays de destination	59
Figure 6 : Répartition de la production totale de Twingo en 2013 en fonction des versions	63
Figure 7 : Illustration de quelques composants utilisés dans une production de masse fortement diversifiée.....	65
Figure 8 : Mise en évidence de contraintes techniques et commerciales entre ECAs.....	68
Figure 9 : Exemple de nomenclature modulaire (tiré de Hegge et Wortmann, 1991).....	77
Figure 10 : Exemple de représentation formelle utilisant le modèle des bases de données relationnelles	78
Figure 11 : Exemple de nomenclature générique (adapté à partir de Hegge et Wortmann, 1991).....	81
Figure 12 : Représentation macroscopique du processus de définition de la Documentation Commerciale	91
Figure 13 : Représentation macroscopique du processus de définition de la Documentation Technique	91
Figure 14 : Schéma global de structuration de la Documentation.....	93
Figure 15 : Schéma global des processus de planification et usage de la Documentation chez Renault	95
Figure 16 : Hiérarchie des éléments composant la Documentation Technique de conception	99
Figure 17 : Exemple d'expression de la Documentation Commerciale explicite pour le client passant une commande	103
Figure 18: Exemple de codification par groupes de caractères significants	103
Figure 19 : Exemple de description complète et explicite en langage commercial.....	104
Figure 20 : Représentation d'ensembles de prestations alternatives (EPAs) et de leurs prestations associées	105
Figure 21 : Représentation de la détermination des ECAs par les EPAs	106

Figure 22 : Représentation des Méta-EPAs.....	125
Figure 23 : Phases du processus de conception défini par Pahl et Beitz (1996) (extrait de Mtopi Fotso, 2006).....	144
Figure 24 : Processus de conception en ingénierie concourante traduit d’Albano et Suh (1994)	145
Figure 25: Schéma et exemple de l'architecture bus	147
Figure 26: Schéma et exemple de l'architecture slot	148
Figure 27: Schéma et exemple de l'architecture sectionnelle	148
Figure 28 : Impact de la modularité dans la charge des équipes de conception (extrait de Sanchez et Collins 2001)	156
Figure 29 : Organisation synchrone à l’usine Daimler d’Hambach	160
Figure 30 : Organisation projet de la Direction de la R&D Renault et responsabilité budgétaire avant la mise en place de la Conception Modulaire.....	164
Figure 31 : Représentation du Processus de conception	166
Figure 32 : Organisation projet de la Direction de la R&D Renault et responsabilité budgétaire après la mise en place de la Conception Modulaire.....	174
Figure 33 : Spectre de la diversité en fonction du niveau de nomenclature	180
Figure 34 : Exemple de "paliers" de la standardisation.....	198
Figure 35 : Exemple de l’importance des volumes de consommation en standardisation	199
Figure 36 : Illustration du lien entre les besoins, les MAs et les CAs.....	207
Figure 37 : Évolution dans le temps du profil de la demande de plusieurs besoins	212
Figure 38 : Représentation du coût total par une fonction affine par morceaux (avec $Q^m = 4$).....	217
Figure 39 : Exemple de modification de la fonction objectif induite par des synergies.	219
Figure 40 : Schéma de principe d’un échangeur (ici un Radiateur de type mécanique)	226
Figure 41 : Illustration de la décomposition retenue du système de refroidissement moteur	226
Figure 42 : Exemples d’architecture de Refroidisseur d’Air de Suralimentation de type air-air	227
Figure 43 : Illustration des deux architectures possibles du groupe moto ventilateur.....	228
Figure 44 : Nomenclature générée par le modèle d’optimisation pour l’étude de cas, partie 1	233
Figure 45 : Nomenclature générée par le modèle d’optimisation pour l’étude de cas, partie 2	234
Figure 46 : Compromis en optimisation multicritères.....	237

Abréviations

ANRT	Association Nationale pour la Recherche en Technologie
ATO	<i>Assembly To Order</i> : Assemblage à la Commande
BOM	<i>Bill of Materials</i> : Nomenclature
CA	Composant Alternatif
CIFRE	Convention Industrielle de Financement par la REcherche
DO	Donneur d'Ordres
Doc	Documentation
DocC	Documentation Commerciale
DocT	Documentation Technique
DSCA	Direction de la Supply Chain Alliance
DSM	<i>Design Structure Matrix</i>
ECA	Ensemble de Composants Alternatifs
EMA	Ensemble de Modules Alternatifs
EPA	Ensemble de Prestations Alternatives
GBOM	<i>Generic Bill of Materials</i> : Nomenclature Générique
GMP	Groupe Moto Propulseur
GMV	Groupe Moto Ventilateur
JAT	Juste A Temps
LAMSADE	Laboratoire de Modélisation et de Simulation pour l'Aide à la DÉcision
MA	Module Alternatif
MBOM	<i>Modular Bill of Materials</i> : Nomenclature Modulaire
MRP	<i>Materials Ressources Planning</i>
PA	Prestation Alternative
PDP	Plan Directeur de Production
PIC	Plan Industriel et Commercial
R&D	Recherche et Développement
RAD	Radiateur
RAS	Refroidisseur d'Air de Suralimentation
SI	Système d'Information
ST	Sous-Traitant
TDC	<i>Total Delivered Cost</i> : coût complet
VCD	Véhicule Complètement Défini

Introduction Générale

De nombreuses entreprises manufacturières passent de la production de masse d'un produit quasi unique à la production en série de produits fortement diversifiés. Le concept de production de masse vise essentiellement à profiter d'effet d'échelle¹. Avec une telle stratégie, la maximisation du profit passe par l'optimisation des cadences et de la qualité de production. Cela a conduit alors les entreprises à standardiser au maximum leurs produits. Cette stratégie industrielle focalisée sur les coûts s'oppose donc a priori à une stratégie commerciale visant à l'augmentation du chiffre d'affaires passant par la diversification de l'offre (Tarondeau, 1998). À l'instar des constructeurs automobiles comme Renault, les entreprises ont dû développer leurs gammes de produits pour répondre toujours plus précisément aux attentes variées des clients. La personnalisation du produit par le client (*customization* en anglais), pratiquée par de plus en plus d'entreprises depuis quelques décennies, apparaît alors comme le fondement d'une telle stratégie commerciale. Les entreprises, restant largement préoccupées par leurs coûts de revient, ***cherchent à développer une personnalisation des produits importante tout en restant dans une stratégie industrielle de production de masse***. Les anglo-saxons résument ce contexte par le concept de *mass customization* (apparu dans Pine, 1993) que l'on choisira de traduire par la ***personnalisation de masse*** en l'absence de traduction officielle partagée par la communauté.

Dans cette thèse, nous rattachons au concept de la personnalisation de masse à la fois :

- (1) ***Une diversité de produits offerts très importante*** : une offre sur le marché d'un ensemble de produits dont la cardinalité est très supérieure au volume de vente, quel que soit l'horizon de temps choisi.
- (2) ***Une variabilité de produits vendus très importante*** : le nombre de produits vendus différents est de l'ordre de grandeur du nombre total de produits vendus.
- (3) ***Une production en masse*** : la production est organisée en ligne, la cadence est élevée et le temps de production unitaire est quasi stable malgré la diversité.

¹ Les économies d'échelle consistent à répartir les coûts fixes sur un volume important de produits pour réduire le coût fixe unitaire.

1. Une diversité toujours plus grande de produits à proposer :

La diversification de la demande des clients peut s'expliquer de façon macroéconomique. Au début de la seconde moitié du XXe siècle, les clients avaient essentiellement des attentes concernant le prix, la robustesse et la réparabilité. Dans les pays matures, l'évolution des niveaux de vie et le boom technologique de la fin du XXe siècle ont transformé les attentes et les besoins des clients. Dans ces mêmes pays, la mondialisation des échanges fait apparaître de nouveaux concurrents sur le marché. Ces deux évolutions du marché font que le client a désormais le choix et souhaite des biens répondant précisément à ses besoins particuliers. Dans le secteur automobile, comme dans celui de l'informatique, la diversité est si importante que nous parlons aujourd'hui de personnalisation. Les entreprises manufacturières sont donc obligées de développer considérablement leurs gammes de produits à tel point qu'aujourd'hui, toutes les voitures fabricables ne seront ni fabriquées ni vendues. Enfin progressivement, le client rentrant dans l'ère de consommation de masse, va aussi imposer aux entreprises d'accélérer le renouvellement des produits, ce qui implique de réduire le temps de mise sur le marché des produits.

En parallèle de ces évolutions socio-économiques sur le marché historique des entreprises, la mondialisation des échanges pousse les entreprises à viser de nouveaux marchés. Ces marchés parfois matures, parfois émergents, sont bien souvent régis par des codes ou des habitudes de consommation différentes de ceux du marché historique. Cela impose donc aux entreprises de s'adapter et donc bien souvent de proposer des gammes différentes de produits en fonction de ces marchés. Il en résulte que l'augmentation de la diversité globale offerte par une entreprise est encore en pleine accélération.

L'évolution formidable des technologies depuis la fin du siècle dernier et le niveau d'exigence des clients en termes de fonctionnalités ont eu tendance à **complexifier** les produits manufacturés. Sans entrer dans les détails tout de suite, nous pouvons dire que la complexité d'un produit est vue ici comme la conséquence du nombre important de composants à assembler et de l'existence de contraintes à leur libre combinaison. Cette définition est proche de la littérature sur les Produits et systèmes complexes (PSCo, cf. Catel et Monateri, 2007) L'automobile est un bel exemple de produit complexe. En effet, la diversité de produits génère une diversité de composants importante mais surtout il existe pour ce genre de produit une interdépendance très forte entre ses différents composants. Dans notre travail, nous nous intéressons à la diversité de produits offerte mais aussi à la diversité de composants à gérer pour concevoir et fabriquer cette diversité de produits.

2. Une organisation en production de masse à maintenir :

La concurrence féroce oblige les entreprises à ajuster le prix de leurs produits et donc à optimiser leurs coûts de revient. Pour les constructeurs automobiles, la pression extraordinaire sur les coûts vise deux objectifs majeurs. Le premier est de limiter les coûts de développement des nouveaux produits qui ont une durée de commercialisation toujours plus courte. Le second est de rendre attractive la production automobile pour les investisseurs ou à défaut, de la rendre bénéficiaire. La maximisation de la marge opérationnelle est un enjeu crucial dans un secteur où elle a du mal à dépasser les 5%. Les entreprises manufacturières sont donc aujourd'hui obligées à la fois de proposer une très large variété de produits et de la renouveler fréquemment tout en optimisant leurs coûts de développement et de production.

3. La diversité et la variabilité impactent les coûts de revient :

La diversité et la variabilité de produits finis s'opposent a priori par nature aux économies d'échelle en production, parce qu'au-delà d'un certain seuil des « *déséconomies de variété* » apparaissent (p83. Tarondeau, 1998). Une diversité accrue a un impact à la fois sur les coûts directs de production mais aussi sur les coûts indirects par l'augmentation de la complexité des activités de gestion de production (planification, ordonnancement, équilibrage, suivi qualité, etc.) (Fisher et Ittner 1999, Salvador *et al.* 2002). La diversité de produits et de composants rend l'activité de conception très délicate (Meyer et Lehnerd, 1997). Elle est aussi à la base de nombreux problèmes opérationnels dans la gestion de la production (Martin et Ishii, 1997). Par exemple, la diversité de produits rend impossible la définition de prévisions fiables au niveau de chaque produit fini. La variabilité de la demande impose, par exemple, une gestion complexe de l'ordonnancement de production pour limiter les temps de réglage et la réduction de la cadence. La diversité de produits induit une diversité de composants et une diversité de processus industriels coûteuses pour l'entreprise (Salvador *et al.* 2002, Fisher *et al.* 1999, Mtapi Fotso, 2006). La diversité de composants et donc potentiellement de fournisseurs, de parcours logistiques d'approvisionnements et de stocks ont aussi des impacts sur les coûts. Enfin, la diversité et la variabilité ont des impacts sur la qualité des produits, ce qui demande plus de contrôles et de retouches et/ou des actions préventives, ce qui augmente in fine encore les coûts.

De nombreux travaux de recherche visent depuis des années à résoudre des difficultés de gestion de production apparues à cause d'une diversification importante. Parmi eux, de nombreux travaux de thèse français ont visé à améliorer la gestion de la production automobile notamment :

- au niveau opérationnel sur l'ordonnancement de la production (Lesert 2006) ou sur la gestion des stocks (Fouque, 1997),
- au niveau tactique sur la planification de la production et la gestion des approvisionnements (Mendy-Bilek, 2007, Camisullis 2008, Sali 2012),
- au niveau stratégique sur la configuration simultanée de Produits et de la Chaîne logistique (Hadj-Hamou 2002, Agard 2002, Da Cunha 2004, Jose Flores 2005).

Tous ces travaux ont en commun d'accepter l'hypothèse plus ou moins implicite qu'une diversité forte de produits finis implique une diversité importante de composants et même une complexité forte de composants. De plus, pour atteindre leur question de recherche, ils admettent l'existence d'une représentation des produits, et de leur composition par une nomenclature. Notre travail, en se positionnant sur des questions *en amont*, questionne précisément ces hypothèses.

4. Objectif et structure de cette thèse :

Cette thèse vise à expliciter les difficultés opérationnelles rencontrées par les industriels dans la gestion de la diversité dans un contexte de personnalisation de masse et à proposer des solutions pour y remédier. Parce que les difficultés observées en gestion de production sont intimement liées à des décisions prises lors du développement des produits, une part importante de nos propositions porte sur la définition des produits. Notre démarche est donc proche des démarches de conception orientées vers l'optimisation de la chaîne logistique (*Design For Logistic*²). À ce titre, nous discuterons différentes solutions et leurs impacts sur la gestion de la chaîne logistique.

Le présent document est le fruit de l'ensemble de nos travaux de recherche réalisés dans le cadre de la thèse « Contribution à la gestion de la personnalisation de masse ». Il est composé de quatre parties regroupant onze chapitres. La première partie s'attachera à poser le problème de la diversité de produits, tandis que les trois autres développeront autant de propositions de solutions. Pour plus d'efficacité dans la lecture et compte tenu de la relative indépendance des parties, l'analyse de littérature usuellement présentée dans une seule partie fera l'objet d'un chapitre dans chaque partie de cette thèse.

La première partie vise à **définir le contexte**. Le Chapitre 1 se focalisera sur le contexte de notre travail de recherche et introduira notre problématique. Le Chapitre 2 présentera le

² Le lecteur désireux de lire plus de détails sur le concept de Design for X peut s'orienter vers le livre de Eastman, (2012) qui fait autorité en la matière.

contexte du sujet de recherche. Il nous permettra de définir les concepts de base que nous mobiliserons ensuite de façon diffuse dans cette thèse et notamment celui de la diversité. La seconde section de ce chapitre nous permettra de proposer une description précise de la diversité dans le secteur automobile basée sur l'étude de Renault. Ce chapitre sera aussi l'occasion de montrer l'intérêt du secteur automobile par rapport à d'autres secteurs faisant aussi face à une forte diversité.

La seconde partie traitera de la **représentation de la diversité** dans les **nomenclatures** de l'entreprise et de l'impact des méthodes de représentation sur la planification des approvisionnements. Le Chapitre 3 s'attachera à analyser les solutions de représentation de la diversité par les nomenclatures proposées dans la littérature. Nous nous pencherons alors sur les concepts clés que sont les nomenclatures modulaires et les nomenclatures génériques. Le Chapitre 4 nous permettra d'introduire la représentation utilisée en automobile et notamment par Renault. Nous proposerons dans ce chapitre une théorisation d'une méthode déjà utilisée par plusieurs industriels mais qui, à notre connaissance, n'a jamais été systématisée dans la littérature. Le Chapitre 5 nous permettra alors d'étudier l'impact de cette représentation de la diversité sur la planification des approvisionnements. Nous expliciterons l'impact et nous examinerons deux façons alternatives de construire les plans directeurs de production.

La troisième partie sera consacrée à la **simplification de la diversité**, c'est-à-dire aux méthodes permettant de faciliter la gestion d'une diversité offerte considérée comme donnée. Cette partie, au cœur des préoccupations initiales de Renault, se focalise sur des démarches de conception en R&D permettant une simplification de la diversité à concevoir mais aussi à produire. Nous mobiliserons alors les concepts déjà anciens de famille de produits, de plateforme mais surtout de **modularité**. Cette partie est une étude du cas Renault. Après un Chapitre 6 synthétisant une littérature abondante sur le sujet, le Chapitre 7 présentera la modularité mise en place par Renault. Nous en présenterons la genèse, les concepts et les enjeux en les confrontant de manière systématique aux démarches décrites dans la littérature. Le Chapitre 8 nous permettra d'analyser les conditions de réussite à la mise en place d'une démarche modulaire. Nous en profiterons pour étudier l'importance de la modularité organisationnelle.

La quatrième et dernière partie introduira notre dernier axe de proposition, celui de la **réduction de la diversité** de composants et de modules par la **standardisation**. Le but est ici de réduire les coûts de conception et de production. Après une revue de littérature dans le Chapitre 9, nous présenterons dans le Chapitre 10, une proposition de modèle de standardisation à plusieurs niveaux. Ce modèle améliore sensiblement les modèles existants à notre connaissance dans la

littérature notamment en s'appuyant sur une maille de définition des besoins permettant l'élaboration de prévisions réalistes dans un secteur à très forte diversité de produits. Nous montrerons aussi que notre proposition permet de définir la nomenclature des modules au lieu d'en utiliser une préexistante et qu'elle prend en compte l'existence de contraintes entre composants. Par la prise en compte de la dimension temporelle, cette approche améliore grandement la cohérence des décisions prises par les opérationnels en phase de conception. Le Chapitre 11 est alors une application concrète de notre modèle à un exemple réel de grande dimension ; nous en profiterons pour discuter quelques difficultés d'implémentation.

En conclusion générale, nous présenterons ce qui nous semble être les conditions de réussite et la progressivité de ces propositions pour la gestion de la diversité. Nous évoquerons enfin des perspectives de recherche dans le domaine de la gestion de la diversité suite à nos travaux.

5. *Éléments de validation et de diffusion de notre travail de recherche :*

Cette thèse a fait l'objet de plusieurs publications et présentations récapitulées ci-dessous :

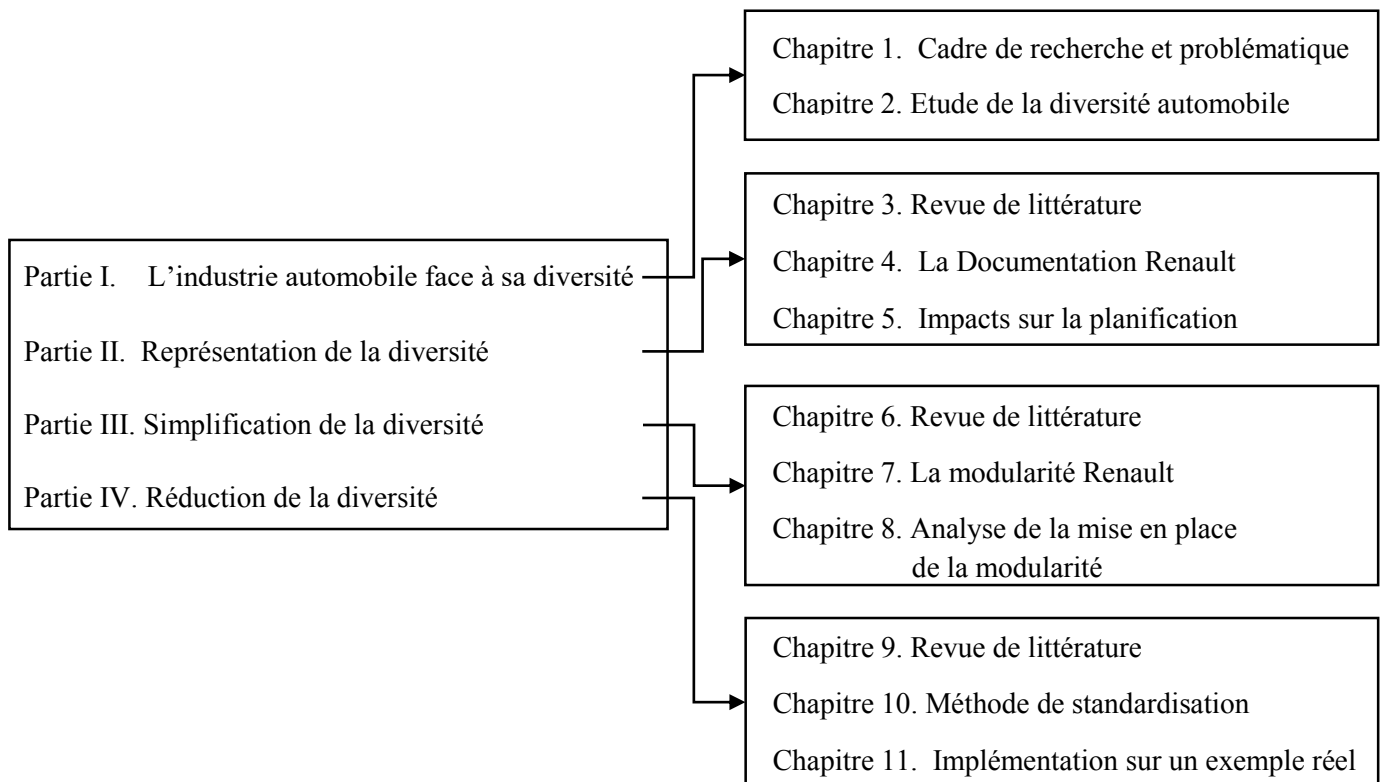
- Publications dans des revues internationales à comité de lecture :
 1. Chatras C., V. Giard et M. Sali 2015. Impact d'une forte diversité sur la structuration des nomenclatures et la construction des Plans Directeurs de Production. *À paraître dans le Journal Européen des Systèmes Automatisés*
 2. Chatras C. et V. Giard 2015. Simultaneous Standardization of modules and their components: a global economic perspective. *À paraître dans International Journal of Production Research*
- Publication en cours de révision dans des revues internationales à comité de lecture :
 1. Chatras C. et V. Giard 2015. Standardisation, commonalité, modularité une perspective économique globale. En cours de révision dans *le Journal Européen des Systèmes Automatisés*
 2. Chatras C., V. Giard et M. Sali 2015. Mass customization impact on Bill of Materials Structure and Master Production Schedule Development Simultaneous. En cours de révision dans *International Journal of Production Research*

- Communications avec actes accessibles en ligne dans des congrès internationaux :
 1. Chatras C., V. Giard et M. Sali 2015. High variety impacts on Bill of Materials Structure: Carmakers case study. *IFAC-PapersOnLine*, 15th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM 2015, 48, no. 3: 1067–72.
doi:10.1016/j.ifacol.2015.06.225
 2. Chatras C., V. Giard et M. Sali 2015. High variety impacts on Master Production Schedule: a case study from the automotive industry. *IFAC-PapersOnLine*, 15th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM 2015, 48, no. 3: 1073–78
doi:10.1016/j.ifacol.2015.06.226
 3. Chatras C. et V. Giard. “Standardization, Commonality, Modularity: A Global Economic Perspective.” In *Advances in Production Management Systems: Innovative Production Management Towards Sustainable Growth*, 365–75. Springer International Publishing, 2015
http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-22756-6_45
 4. Chatras C. et V. Giard 2015. Standardisation, commonalité, modularité : une perspective économique globale. *11^{ème} CIGI Québec, Canada* (ISBN 978-2-89524-426-4)
<http://www.congresgi.org>
- Communications dans des congrès internationaux avec évaluation en double aveugle et sans actes disponibles en ligne:
 1. Chatras C., V. Giard et M. Sali 2013. Methodological issues of the master plan schedule construction in mass customization, *22nd ICPR, Iguassu, Brésil*
 2. Chatras C. et V. Giard 2014. Economic variety control and modularity. *5th ILS Breda, Pays-Bas*

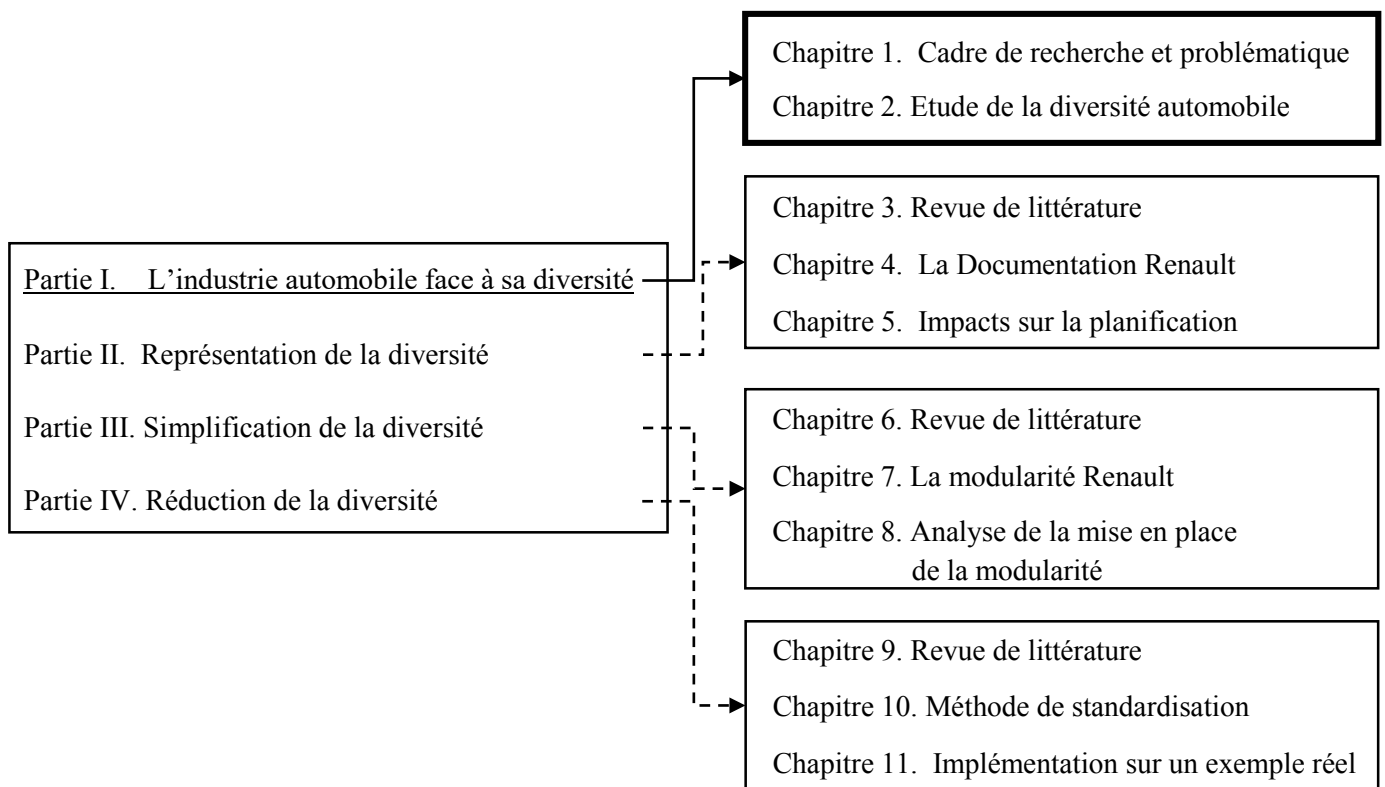
6. Aide aux lecteurs :

Pour permettre aux lecteurs de se repérer facilement dans la structure de cette thèse, le texte comporte un grand nombre de liens hypertextes utilisables dans sa version électronique : toutes les références à des paragraphes (§) ou à des pages (p.) ou à des tableaux ou à des figures sont des renvois hypertextes.

De plus, pour aider le lecteur à se retrouver dans la structure du document, le plan général reprenant la structuration des parties par chapitre sera repris en introduction de chaque partie sous la forme d'un schéma comme celui ci-dessous.



Partie I. L'industrie automobile face à sa diversité : la personnalisation de masse



Introduction de la Partie I

Cette partie a pour but de présenter le contexte de notre travail. Cette description du contexte s'articule autour de deux thèmes, le premier (Chapitre 1) concerne le cadre de notre recherche tandis que le second (Chapitre 2) concerne la spécification de notre objet d'étude.

Dans le Chapitre 1 nous détaillerons dans un premier temps le cadre pratique et les objectifs initiaux de notre travail de recherche. Nous présenterons ensuite la problématique de cette thèse puis l'organisation de notre travail pour y parvenir.

Dans le Chapitre 2, nous discuterons de la diversité et plus précisément de la diversité en automobile. Il a été important à un moment dans nos travaux de revenir aux fondamentaux du concept de diversité. Nous présenterons alors la synthèse de notre réflexion qui nous permettra ensuite d'éclairer de façon précise notre positionnement. Nous en profiterons pour préciser l'enjeu de la diversité dans le secteur automobile et nous apporterons, par une analyse de la diversité existante, un certain nombre de définitions utiles à la compréhension de la suite de la thèse.

Chapitre 1. Cadre de recherche et problématique

1. Présentation du cadre de la recherche et définition des objectifs

1.1. Cadre de la recherche

Le travail présenté dans cette thèse est le fruit de 3 ans de recherche pour l'obtention du titre de Docteur en Gestion de l'Université Paris-Dauphine. Il s'inscrit dans le cadre d'un contrat de recherche entre le constructeur automobile Renault SA et le laboratoire LAMSADE. Ce partenariat a pris la forme d'une Convention Industrielle de Financement par la REcherche (CIFRE) régie par l'Association Nationale pour la Recherche en Technologie (ANRT). Ce type de partenariat présente l'avantage de placer la recherche au plus près des problématiques opérationnelles permettant à la fois de fournir un terrain large d'investigation aux chercheurs et de fournir des réponses de rupture mais applicables aux industriels.

1.1.1. Cadre universitaire

Ce travail de recherche s'inscrit dans une série de travaux engagés par le LAMSADE (LABoratoire de Modélisation et de Simulation pour l'Aide à la DÉcision), en partenariat avec Renault depuis plus de dix ans. Ces travaux ont proposé de nombreuses solutions de gestion pour améliorer les processus et les échanges au sein de la chaîne logistique :

- Mendy-Bilek 2007 : Cette thèse s'intéresse au partage d'informations sur la demande dans un environnement de production de masse fortement diversifiée. Ces travaux étudient la performance des techniques de pilotage de la production existantes et proposent de nouvelles règles plus efficaces permettant la production synchrone sur une chaîne logistique. Cette politique évite les ruptures de stocks et diminue nettement les stocks de sécurité. Ils proposent aussi une règle de choix de configuration en fonction de caractéristiques de la chaîne logistique.
- Camisullis 2008 : Cette thèse s'intéresse aux déterminants de la capacité d'une chaîne logistique-amont dont le dernier maillon est une ligne d'assemblage permettant une production de masse de produits fortement diversifiés. Ces travaux analysent aussi l'impact du lotissement des approvisionnements qui oblige à détenir un stock de sécurité, même en univers certain. Ils proposent de nouvelles règles et les comparent aux règles utilisées par Renault. Ils évoquent enfin des situations plus complexes caractérisées par le partage de l'approvisionnement de composants alternatifs entre

plusieurs fournisseurs et le cas d'un fournisseur ayant plusieurs clients n'appartenant pas nécessairement à la même chaîne logistique.

- Sali 2012 : Cette thèse s'intéresse au mode d'exploitation de la demande prévisionnelle pour le pilotage des flux amont dans un contexte de production de masse de produits fortement diversifiés et de dispersion géographique des unités de production. Ces travaux mettent en évidence des phénomènes d'effet coup de fouet en amont de la chaîne logistique. Ils proposent une adaptation de la MRP (Material Resources Planning) permettant d'exploiter au mieux l'information prévisionnelle qui se base sur l'exploitation statistique des nomenclatures de planification et la diffusion d'informations sur les niveaux de recomplètement le long de la chaîne logistique amont.

Ces travaux montrent de façon claire l'étendue des difficultés opérationnelles engendrées par la production de masse de véhicules fortement diversifiés. Ces travaux justifient le besoin de notre sujet de recherche focalisé en amont de ces problèmes de gestion en visant directement la diversité des produits et des composants.

1.1.2. Cadre Renault

Le point de départ de notre recherche consiste en une demande formulée par le Département d'Organisation des Processus (DOP) pour obtenir un éclairage global sur la problématique, nouvelle pour Renault, de la modularité et de son impact sur la chaîne logistique (cf. Annexe 1). Cette problématique a rapidement été élargie par les parties prenantes pour répondre à un enjeu dans lequel s'inscrit la modularité qu'est la gestion de la diversité. Le DOP était l'entité chargée de développer et de standardiser les méthodes de gestion de l'ensemble des processus de la chaîne logistique à l'échelle mondiale pour Renault. Suite à la convergence des organisations de Renault et Nissan, dans le cadre de leur Alliance, ce Département a été éclaté en services qui se sont alors rattachés en fonction de leur périmètre aux autres Directions de la Direction de la Supply Chain Alliance (DSCA). Dans le cadre de cette réorganisation, j'ai été rattaché au département en charge des processus liés à l'établissement, la mise à jour et l'utilisation des systèmes de nomenclatures chez Renault. Mes travaux de recherche dépassant le périmètre de ce Département, j'ai également travaillé en interaction avec deux autres Départements :

- Le Département des Projets et des Programmes Logistiques (DPPL). Cette Direction rattachée elle aussi à la DSCA, est à la frontière entre les équipes de Recherche et Développement (R&D) et les équipes en charge de la définition de la chaîne logistique (Transport, Emballage, Capacité fournisseur, etc.). Son rôle est, entre autres, de

coordonner les acteurs de la DSCA et de leur fournir les données R&D nécessaires à la définition des flux de composants et de produits avant leur production. À ce titre, elle est l'interface privilégiée de la DSCA face à la Direction de la R&D et joue donc un rôle important dans la prise en compte en amont des contraintes et besoins de la chaîne logistique.

- Le Département de la Standardisation appelé « Standardization Office » (SO). Rattaché à la Direction de la R&D, il a en charge le développement et l'animation de processus de standardisation pour la Direction de la R&D. Très actif depuis 2009, il est en charge notamment de la mise en place de la conception modulaire chez Renault sur laquelle nous reviendrons plus amplement dans la troisième partie.

Cette rapide description de l'environnement de travail dans lequel cette thèse a été conduite permet d'apprécier la transversalité de notre sujet d'étude et témoigne de l'intérêt porté par Renault à ce sujet. Les raisons de cette attention particulière accordée à ce phénomène seront traitées dans le §1.2 tandis que le caractère innovant de la problématique, qui justifie son traitement dans le cadre d'un travail de recherche scientifique, sera évoqué dans le §3.

1.2. Objectif de la recherche

L'objectif initial assigné par Renault à cette thèse CIFRE est de proposer une étude ex ante de l'impact sur la chaîne logistique de la mise en place d'une démarche particulière de conception de produits au sein de la Direction de la R&D (cf Annexe 1). En avril 2012, date de la rédaction de cet objectif, les processus de conception modulaire mis en place par la Direction de la R&D de Renault commencent à prendre de l'ampleur. Face à cette montée en puissance, le DOP identifie un certain nombre de risques potentiels et en premier lieu, celui d'une saturation de la capacité de certains fournisseurs résultant de l'accroissement de la commonalité de composants. Renault, en écrivant cet objectif, cherche donc à pouvoir anticiper les risques sur sa chaîne logistique liés à la réduction de la diversité de composants qui serait potentiellement induite par la conception modulaire. Très rapidement après le début du partenariat de recherche, l'objectif est réorienté. Il est alors question de ***proposer et d'analyser les méthodes permettant de rendre compatibles une diversité très forte de produits et l'organisation économique de production de masse***. Sans rentrer dans le détail ici, ce changement d'objectif fait suite au constat initial de l'absence de lien automatique entre conception modulaire et réduction de la diversité des composants. Nous développerons ce point dans la troisième partie de cette thèse. Nous pouvons

déjà dire que la conception modulaire peut être une des solutions pour gérer la diversité de produits.

Pour atteindre cet objectif global, nous avons adopté de façon quasi systématique une démarche en trois étapes. La première étape positionne notre travail dans un champ théorique par une analyse de la littérature existante. La deuxième étape étudie en détail ces processus et méthodes mis en place par Renault. Enfin, la troisième étape analyse l'impact sur la chaîne logistique du concept étudié en discutant les théories et pratiques introduites aux deux premières étapes et en proposant des solutions innovantes. Nous avons utilisé cette méthode pour étudier tour à tour les moyens de description de la diversité que sont les nomenclatures, les méthodes de simplification de la diversité que condense la conception modulaire et la standardisation qui permet de réduire la diversité de composants en dernier recours.

2. Problématique de la gestion de la diversité dans un contexte de personnalisation de masse

Initialement, les manufactures ont eu pour vocation de remplacer l'artisanat pour produire économiquement des biens de caractéristiques stables et donc substituables. C'est alors le début de la **production de masse**. Cette organisation permet de minimiser les coûts unitaires en fabriquant de très grands volumes, bénéficiant ainsi d'économies d'échelle. Dans ce cadre de la production de masse, l'évolution technique et économique a conduit ensuite à promouvoir la diversité et à en faire un argument de vente. Aujourd'hui, la diversité est telle dans le secteur automobile que l'on parle de **personnalisation de produits ou de personnalisation de masse** traduction de l'anglais « *mass customization* ».

En **gestion**, et particulièrement en **gestion industrielle**, les impacts de la diversité bien que difficilement quantifiables économiquement, sont relativement bien connus aujourd'hui. De nombreux travaux considèrent cette diversité comme une donnée et tentent d'en réduire les conséquences négatives sur la chaîne logistique (c'est notamment le cas des travaux cités dans Introduction Générale, p21). Différents processus et/ou méthodes peuvent être mis en place pour gérer et simplifier cette diversité.

Pour être économiquement viable, la personnalisation du produit et donc la variété des produits à fabriquer, doivent être compatibles avec les économies d'échelle historiquement permises par la production de masse. Ce tour de force est basé sur deux principaux concepts complémentaires et liés:

- Celui de **lignes de production flexibles**. Tout un courant de la littérature semble opposer le concept de production de masse et celui de production *Lean*. Ce courant de pensée définit la production de masse par la standardisation du produit qui selon nous en est en fait qu'une de ses conséquences. A l'opposé, il définit les organisations *Lean* par le fait qu'elles cherchent à rendre le système de production suffisamment flexible (par des logiques de Juste à temps, de différenciation retardée ou de production synchrone par exemple) pour réduire l'impact d'une demande imprévisible et changeante en produits finis. Ce concept est depuis longtemps étudié par les universitaires, notamment dans le secteur automobile sous l'influence du succès des constructeurs japonais. Aujourd'hui, les processus et outils de production sont tels que l'amélioration de la performance de la production semble devoir essentiellement passer par des changements en amont de la production, dans la définition de la diversité de produits finis.
- Celui de **la dissociation de la diversité externe de la diversité interne** à une entreprise. Comme nous le verrons en détail (chapitre 2 §1.3), le but est d'élargir la diversité externe, c'est-à-dire commerciale visible des clients tout en réduisant la diversité interne, c'est-à-dire de conception et de production qui y répond. Cette approche de la diversité doit permettre à la fois de relaxer un certain nombre de contraintes qui ont complexifié la gestion de la production et d'augmenter de manière quasi automatique la flexibilité des lignes de production.

Cette thèse se concentre donc exclusivement sur la diversité interne et s'inscrit donc dans le second concept. À la demande de la Direction de la DSCA de Renault SAS, notre travail de recherche vise à *comprendre les mécanismes possibles de dissociation de la diversité externe, de la diversité interne et de leurs impacts sur la gestion de la chaîne logistique dans un contexte de personnalisation de masse*. Pour dissocier la diversité externe de la diversité interne, il est nécessaire de faire évoluer à la fois les systèmes de représentation de la diversité et la définition même des produits et des sous-systèmes rentrant dans leur composition en conception. Face à cette question, nous nous focalisons sur trois démarches complémentaires :

- En considérant la diversité comme donnée, la première approche s'intéresse à la **représentation de la diversité interne et de la diversité externe** permettant à la fois une personnalisation aisée du produit par le client, une définition non ambiguë de la liste des composants à assembler pour réaliser un produit et une redondance limitée de l'information à stocker et à maintenir à jour. Cela passe par une redéfinition des moyens

de description des produits notamment de leurs nomenclatures. Parce que les prévisions s'appuient à la fois sur la diversité externe et la diversité interne, un tel changement de structure de la nomenclature a un impact sur la planification des approvisionnements.

- En considérant seulement la diversité externe, i.e. commerciale comme donnée, la seconde réponse réside dans un **changement d'architecture produit**. **La modularisation des plateformes de produits**, comme nous la verrons dans la troisième partie cherche directement à simplifier la définition et la conception de la diversité interne nécessaire pour répondre à la diversité externe voulue. La modularité de conception doit permettre de réduire les contraintes de combinaisons entre sous-systèmes. Du point de vue stratégique, cela peut avoir des impacts majeurs autant dans la configuration de la chaîne logistique que dans la description de la diversité. Du point de vue tactique, cela peut réduire la complexité des prévisions.
- Enfin, une autre réponse à la diversité interne peut aussi être sa réduction par le biais de la **standardisation**. L'idée ici, n'est pas de proposer moins de fonctionnalités aux clients mais plutôt d'analyser économiquement les niveaux de performance à offrir aux clients par fonctionnalité. En effet, il peut être plus coûteux par exemple de proposer une diversité de mécanismes de lève-vitre sur un modèle de voiture plutôt que de proposer, de série, les vitres électriques sur tous les modèles. Cette analyse économique doit tenir compte de caractéristiques de la chaîne logistique héritées du passé et du coût lié à un changement de configuration de cette chaîne.

Les deux dernières démarches sont des démarches de conception. Contrairement à ce que propose un certain nombre de travaux que nous détaillerons dans les chapitres de revues de littérature, **dans cette thèse nous ne considérerons pas directement une configuration simultanée des produits et de la chaîne logistique**. Cette double configuration, intéressante dans certains environnements, ne semble que très peu applicable à un constructeur automobile. En effet, la conception de la chaîne logistique, entendue essentiellement comme la définition des sites de production, est une activité stratégique pour les constructeurs qui est réalisée en amont de la définition de la diversité en fonction d'un grand nombre de paramètres dont certains sont exogènes à l'entreprise (comme les taux de change ou l'accord de compétitivité en France signé en 2013 par Renault).

Cette problématique issue de l'industrie automobile n'en est pas moins générique. En effet, la personnalisation de masse ne concerne pas que ce secteur de l'industrie, d'autres secteurs comme celui de l'informatique et de l'électronique de façon générale ou celui de la construction

ont vécu ou vivront des mutations comparables. Cette thèse, ayant comme terrain de validation l'industrie automobile, décrit des enjeux et propose des solutions qui sont extensibles sans difficulté à d'autres secteurs.

3. Organisation du travail de recherche

3.1. Instance de contrôle et macroplanning du projet de thèse

Dans le cadre d'un contrat CIFRE, les instances de gestion sont naturellement industrielles et universitaires. L'instance de contrôle au départ de notre travail a été bipartite afin de cadrer le sujet et la démarche. Cette instance s'est ensuite réunie de façon annuelle pour faire un état d'avancement et définir le reste à faire ainsi que les orientations.

Une seconde instance de gestion industrielle composée des directeurs de départements et d'acteurs opérationnels des processus étudiés dans nos travaux s'est aussi réunie plus fréquemment. L'objectif de ces réunions était double. D'une part, il nous permettait de diffuser de façon officielle notre analyse des méthodes pratiquées par le Groupe en comparaison avec des méthodes de références issues de la littérature universitaire. D'autre part, il nous permettait de proposer des méthodes alternatives d'amélioration et d'en suivre la mise en place.

L'instance de gestion universitaire est incarnée à la fois par le directeur de thèse, mais aussi par les discussions et présentations lors des congrès ou lors de propositions d'articles pour publication (cf. Introduction Générale p24). Le directeur de thèse a eu pour fonction de suivre l'état d'avancement à court terme. Les échanges avec le directeur de thèse ont pris la forme de points d'avancement bimensuels associés à de nombreuses discussions. Par ces réunions, le directeur de thèse a permis de construire une réflexion et d'en limiter les dérives. Les échanges académiques ont de leur côté permis de passer notre travail de recherche à la critique de scientifiques. L'avancement formel de notre travail est en grande partie lié à la qualité des articles soumis en conférences puisque tous ces écrits étaient soumis ensuite à des processus de sélection stricts, avec la nécessité d'une prise en compte des remarques formulées par des relecteurs anonymes. Les différentes évaluations que nous avons reçues nous ont beaucoup apporté dans notre travail, tant vis-à-vis de la rigueur de notre propos que sur la forme pour le présenter.

Notre travail de recherche aboutissant à cette thèse de Doctorat a été réalisé sur trois ans. De façon macroscopique, nous pouvons représenter à la maille trimestrielle les principaux jalons et les activités pour y parvenir dans le tableau suivant.

Tableau 1 : Macro planning de la thèse

		2013				2014				2015				2016	
			trimestre 2	trimestre 3	trimestre 4	trimestre 1	trimestre 2	trimestre 3	trimestre 4	trimestre 1	trimestre 2	trimestre 3	trimestre 4	trimestre 1	
Imprégnation															
Recherche Bibliographique															
Analyse de l'existant															
Modélisation															
Implémentation															
Nomenclature	Conférence 1			★ ICPR22											
	Conférence 2											★ INCOM15 (a)			
	Conférence 3											★ INCOM15 (b)			
	Article 1 (français) : JESA								★ Soumission		★ Révision	★ Acceptation			
	Article 2 (anglais)								★ Soumission 1		★ Révision	★ Soumission 2			
Standardisation	Conférence 4														
	Conférence 5												★ APMS 2015		
	Conférence 6												★ 11 ^{ème} CIGI		
	Article 1 (français)											★ Soumission			
	Article 2 (anglais) : IJPR											★ Soumission		★ Acceptation	
Thèse						★ Rapport ANRT 1				★ Rapport ANRT 2		★		★ Soutenance	
Rapport de thèse															

3.2. Méthodologie d'analyse de la littérature

Cette thèse étant constituée de trois parties assez distinctes, nous avons jugé plus efficace de développer un chapitre d'analyse de la littérature dans chacune des parties plutôt que de les regrouper. Cela nous permet de poser les concepts de manière plus progressive. Nous avons donc focalisé nos analyses de littérature sur les nomenclatures, sur la modularité et sur la standardisation. Ces trois champs ont déjà largement fait l'objet d'écrits universitaires et ce depuis longtemps. Face à une littérature très riche, devenue facilement accessible avec les progrès des bases de données documentaires, il a fallu d'une part, focaliser davantage notre sujet d'étude et d'autre part, structurer par étapes notre travail d'analyse. Nous pouvons décrire ces principales étapes de la manière suivante :

Étape 1 : Construction d'une base d'articles priorisés :

- La recherche d'articles traitant d'un sujet a été faite classiquement par l'usage de mots-clés dans des bases d'articles, principalement Ebsco et Science Direct, ainsi que par quelques articles de presse grand public ou quelques extraits d'ouvrages identifiés au travers des moteurs de Google scholar. Les mots-clés ont fait l'objet de plusieurs mises à jour, sans être exhaustif, les principaux sont :
 1. Pour la nomenclature : *bill of material, BOM, BOM definition, BOM design, family product design, Generic BOM, modular BOM, mass customization*

2. Pour la modularité : *Module, modularity, modular design, modular production, modular architecture, module definition, module choice, product architecture, interfaces, modular organization, supply chain modularity*
 3. Pour la standardisation : *standardization, configuration, variety control, diversity, diversity rationalization, diversity management, diversity reduction, commonality, carry over.*
- Nous avons téléchargé les articles sur la base de leurs titres. Notre critère est simple : le titre doit être porteur d'un des mots-clés ou évoquer de façon claire un aspect en lien direct avec notre sujet de recherche.
 - Nous avons alors effectué un second filtre sur la base des résumés. L'ensemble des articles retenus a constitué une base. Nous essayons de la maintenir à jour de façon périodique.
 - La recherche des auteurs majeurs fut longue compte tenu du nombre d'articles trouvés, nous avons construit un tableau avec l'ensemble des titres et des auteurs de chaque article de notre base. Nous avons alors comptabilisé pour chaque article le nombre de fois qu'il était cité dans les autres articles de la base et pour chaque auteur (premier et deuxième au plus) aussi.
 - Nous avons alors priorisé notre lecture comme suit :
 1. d'abord les articles les plus cités, écrits par les auteurs les plus cités
 2. puis les articles les plus cités seulement
 3. puis les auteurs les plus cités seulement.

Étape 2 : Analyse des articles et prise de notes de synthèse

- La lecture des articles passe par une phase de compréhension. Le plus pratique fut pour nous de surligner les éléments importants dans chaque article en différenciant les éléments de définition apportés par les auteurs et les éléments permettant de comprendre la position ou les hypothèses des auteurs.
- Nous avons alors réalisé ce travail par lot d'un petit nombre d'articles, environ 5. Ce bouclage dans le temps nous a permis d'assimiler nos lectures et de finalement sélectionner parmi nos éléments surlignés ceux qui constituent vraiment des éléments pertinents et particuliers à chaque article.
- Nous avons alors rédigé des notes prenant parfois la forme de listes de citations et parfois la forme de résumés sur chacun des articles.

Cette prise de notes en deux étapes par petite boucle nous a permis de filtrer encore davantage sur les articles pertinents pour nos travaux de recherche. Le choix des articles faisant partie d'une même boucle a été fait sur la base des résumés.

Étape 3 : Comparaison des articles et création d'une grille de lecture

- Sur la base des résumés et en fonction de notre travail de recherche qui se précise en parallèle de ces lectures, nous avons défini les caractéristiques majeures des méthodes permettant de différencier les articles entre eux et avec notre démarche. Cette grille est nécessairement le fruit de l'assimilation de nos lectures et d'une réflexion avancée sur nos propres hypothèses de recherche.
- Chaque article peut donc être défini selon chaque axe que constituent ces caractéristiques. Il en résulte alors une grille de lecture permettant de positionner chaque travail. Ces grilles, fournies systématiquement en guise de conclusion des chapitres de littérature de cette thèse, permettent ainsi de façon synthétique de montrer en quoi notre démarche s'écarte de l'état de l'art.

Chapitre 2. Etude de la diversité automobile

Si l'on s'accorde à dire qu'il faut maîtriser la diversité, il importe de commencer par définir ce qu'est la diversité. Ce chapitre a donc pour objectif de poser le cadre de référence essentiel à la compréhension des autres parties de cette thèse. Le §1 nous permettra donc de discuter le concept de diversité. Pour étudier ce concept, il est intéressant de s'appuyer sur une approche générique mettant en évidence ce qui fonde la diversité des produits pour les spécialistes de la gestion et du management industriel. La description de cette approche générique sera immédiatement suivie d'un certain nombre d'exemples qui reprendront chacun des concepts introduits (§2.1). Cela nous permettra de poser ensuite au §1.3, nos propres définitions de la diversité auxquelles nous ferons référence dans la suite de notre travail. Le §2 nous permettra de décrire la diversité actuelle du secteur automobile. Nous adopterons le point de vue d'un client lambda au §2.1 tandis qu'au §2.2 nous nous attacherons à la diversité en composants gérée par l'entreprise en interne. Ce paragraphe nous permettra de discuter des points communs et des particularités du secteur automobile vis-à-vis d'autres secteurs. Ainsi, dans la suite de cette thèse, nous ciblerons nos exemples sur l'automobile sans pour autant perdre en généralité.

1. Une diversité contingente

1.1. Concept de diversité

La question de la diversité est centrale dans les relations humaines. Tout en se reconnaissant comme étant unique, chaque individu cherche à se rattacher à un ou plusieurs groupes d'individus qui lui ressemblent d'un certain point de vue. Cette problématique est notamment au cœur de la sociologie. Une façon de définir la diversité est donc de la définir en creux en définissant la ressemblance ou l'appartenance. Pour définir la diversité de biens, on peut donc définir d'abord la substituabilité. D'un point de vue économique, s'est posé très tôt le problème de la substituabilité de produits faisant l'objet d'une transaction commerciale (ce pain vendu par le boulanger est-il équivalent à cet autre pain situé juste à côté dans le présentoir ?). Cette question a conduit les juristes à proposer le concept de bien fongible pour sécuriser les échanges commerciaux sur l'acceptation, par les deux parties, d'une substituabilité considérée comme parfaite de produits offerts à la vente.

Implicitement ou explicitement, la diversité se définit sur un *ensemble d'objets* qui peut être observable ou virtuel. Dans ce dernier cas, il s'agit généralement d'un ensemble d'objets susceptibles d'exister à une échéance plus ou moins lointaine. Dans les deux cas, l'ensemble

est circonscrit dans un cadre spatio-temporel précis. En outre, il est déterminé par un *groupe d'observateurs* pour lesquels ces objets partagent des *caractéristiques communes* définies par l'usage qu'ils peuvent en faire, ce qui introduit une dimension subjective dans la définition de cet ensemble. Il est important de préciser ici que les groupes d'observateurs peuvent être des groupes de clients, de commerciaux, d'ingénieurs de conception ou de production etc. Pour un groupe d'observateurs, ces objets ne sont pas pour autant tous interchangeables en raison de l'existence de *caractéristiques spécifiques* non partagées par tous les éléments de l'ensemble. Seuls les objets partageant les mêmes valeurs de ces caractéristiques spécifiques sont alors considérés comme rigoureusement interchangeables, ce qui introduit une *partition* de l'ensemble et définit la diversité de l'ensemble pour ce groupe d'observateurs.

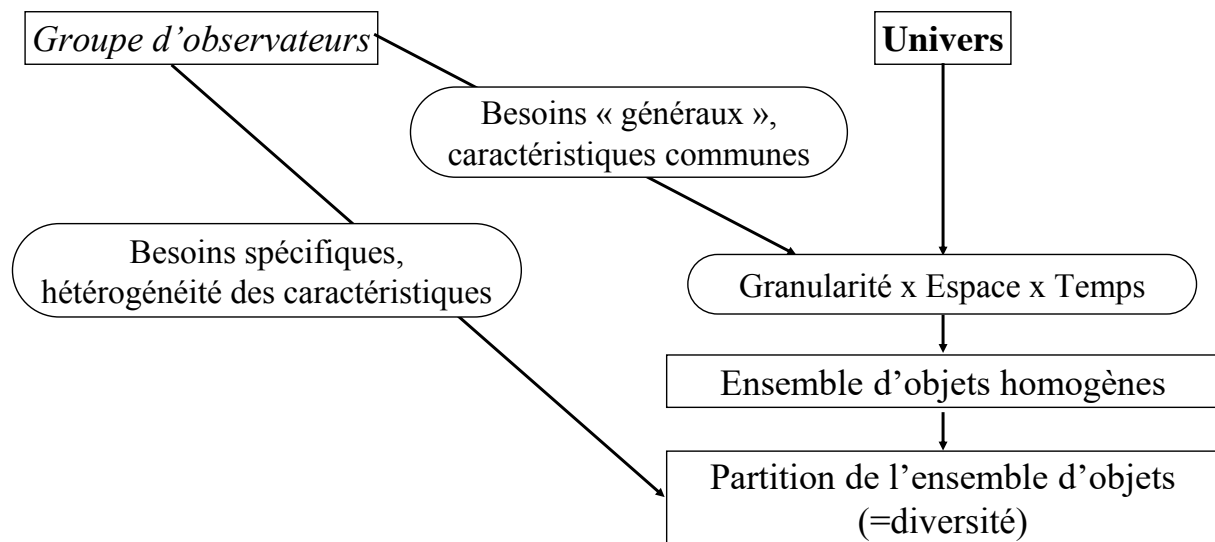


Figure 1 : Définition de la diversité par un groupe d'observateurs

Des individus appartenant ou non à ce groupe peuvent ne pas partager le point de vue collectif et adopter une liste partiellement différente de caractéristiques spécifiques. Cette différence de points de vue entre le collectif et l'individuel est classique et multiplie les perceptions de la diversité. Cela étant, la vision collective délimite l'ensemble étudié par des caractéristiques générales d'usage et définit aussi sa diversité, par la prise en compte de caractéristiques spécifiques, cette diversité pouvant être révisée par un sous-groupe d'observateurs par l'adjonction de nouvelles caractéristiques spécifiques.

1.2. Mise en évidence inductive de l'importance du point de vue

Examinons successivement les éléments qui fondent ce concept de diversité en gestion et en management industriel en nous appuyant sur l'exemple de l'automobile. Le [Tableau 2](#) illustre

les principaux cas de figure que l'on peut rencontrer ; dans certains de ces exemples, le point de vue d'un sous-groupe est pris en compte. La variété des points de vue explique les divergences de mesure de la diversité.

Tableau 2 : Exemples illustrant la multiplicité des définitions de la diversité en automobile

	Groupe d'observateurs	Besoins communs	Caractéristiques communes			Ensemble	Besoins spécifiques	Partition / Diversité
			Granularité	Espace	Temps			
Exemple 1	Clients potentiels du loueur Hertz en France, tels que définis par la Direction commerciale de Hertz - France	Location d'une voiture pour plusieurs jours	Véhicules de différentes marques	Agences localisées en France	5 novembre 2013 à 8 heures	Ensemble des véhicules disponibles à la location en France à cette date	Espace, sécurité, budget ...	Diversité commerciale définie par 6 familles de véhicules
Exemple 2	Familles avec 2 enfants arrivant à l'agence de Roissy sans réservation			Agence de Roissy	5 novembre 2013 à 17 heures	Sous-ensemble des véhicules disponibles à la location à Roissy	Ceux d'une (ou deux familles + critères additionnels	Partition spécifique incluant de nouveaux critères
Exemple 3	Responsables de l'ordonnancement de l'usine de Flins	Préparation de la production d'une journée	Véhicules à produire	Ensemble défini à l'entrée de ligne tôlerie	Dans 5 jours ouvrables, de 8 heures à 17 heures	Ensemble des 400 véhicules à produire pour cette journée	Connaissance des couleurs + caractéristiques impliquant des contraintes d'espacement...	Partition de l'ensemble des véhicules sur la base de ces critères d'ordonnancement
Exemple 4	Responsables de l'approvisionnement de moteurs de l'usine de Flins			Ensemble défini au poste de montage des moteurs sur la ligne d'assemblage			Moteurs à approvisionner pour cette journée	Partition de l'ensemble des véhicules sur la base des moteurs différents à monter
Exemple 5	Clients potentiels d'une Clio en France	Achat d'une Clio dans un mois	Véhicules (offerts via configurateur)	Véhicules à la tombée de la chaîne d'assemblage	Dans un mois	Ensemble virtuel de toutes les Clios pouvant être vendues en France (défini par le configurateur)	Liés à une cinquantaine d'ensembles de modules alternatifs ou optionnels	Diversité visible offerte par le configurateur
Exemple 6	Clients se présentant à l'agence de Montrouge			Véhicules à la tombée de la chaîne d'assemblage	Dans un mois (ou avant si véhicule désiré est déjà programmé en production et non réservé)	Restriction de l'ensemble précédent aux véhicules respectant les besoins spécifiques	Boîte automatique & niveau d'équipement "moyen"	Très forte réduction de la diversité par rapport à celle offerte par le configurateur
Exemple 7	Ingénieurs du bureau d'études de Renault	Analyse de réutilisation de moteurs dans un projet d'un nouveau véhicule	Moteur (nu)	Espace virtuel	Décembre 2013	Ensemble virtuel des moteurs disponibles	Cahier des charges fonctionnels	Diversité traduite par la nomenclature des moteurs

- Le premier exemple porte sur l'ensemble des véhicules disponibles à la location le 5 novembre au matin (cadre temporel) dans les agences Hertz localisées en France (cadre spatial). Ces véhicules de marques différentes sont mis à disposition des clients pendant un certain temps, dans le cadre d'un contrat de location, pour les transporter avec leurs bagages (besoins communs). Les besoins de ces clients potentiels se définissent par un ensemble de critères (espace offert, confort, puissance, coût de la location...) utilisés par le service commercial pour segmenter l'offre en six catégories de véhicules, ce service commercial jouant le rôle de porte-parole des clients. Les véhicules d'une catégorie (peu importe la marque, la couleur, etc.) sont substituables d'un point de vue tarifaire et offrent des prestations considérées comme similaires.
- Le deuxième exemple est une variante du précédent. Il porte sur l'ensemble des véhicules disponibles à la location le 5 novembre à 17 heures, dans l'agence Hertz de l'aéroport de Roissy dans laquelle rentre une famille avec deux enfants. Cette famille s'intéresse à l'une des 6 familles correspondant à ses besoins en termes d'espace et de prix. Les véhicules correspondants ne sont pas pour autant substituables : des critères additionnels, comme la marque ou la couleur, vont intervenir dans le choix final du véhicule à louer.
- Le troisième et le quatrième exemple portent sur l'ensemble des Clio à produire dans cinq jours à l'usine de Flins, entre 8 heures et 17 heures (cadre temporel). L'ensemble des véhicules présents sur une ligne d'assemblage se modifie de minute en minute. Il faut définir le point d'observation de cet ensemble (cadre spatial) qui va dépendre du groupe d'observateurs et de ses besoins. L'équipe chargée de l'ordonnancement s'intéressera aux véhicules décomptés à l'entrée de la ligne de tôlerie ; ses besoins étant liés à un travail ordonnancement. Dans ce contexte, un nombre limité de caractéristiques de ces véhicules est à prendre en compte : la couleur du véhicule (processus de peinture) et les éléments alternatifs ou optionnels qui induisent des contraintes d'espacement à respecter. La prise en compte de ces caractéristiques conduit à une partition de cet ensemble définissant la diversité pour les responsables de l'ordonnancement qui partagent tous le même point de vue. Supposons maintenant que le groupe d'observateurs soit celui des responsables de l'approvisionnement des moteurs pour cette même journée. Le cadre temporel reste le même mais le point d'observation se déplace au poste de la ligne d'assemblage qui monte ces moteurs. La partition de l'ensemble des véhicules repose alors sur celle des moteurs physiquement différents qui seront montés sur ces véhicules. La partition de l'ensemble que feraient ces derniers

observateurs a donc toutes les chances d'être différente de celle proposée par l'équipe chargée de l'ordonnancement de la ligne.

- Les cinquième et sixième exemples portent sur l'ensemble virtuel des Clios susceptibles d'être vendues (besoins communs) à des clients potentiels (groupe d'observateurs) en France (cadre spatial) dans un mois (cadre temporel). L'offre commerciale en France de cette gamme de véhicules est visible au travers du configurateur Web utilisable par un client pour spécifier sa demande en effectuant progressivement des choix qui portent notamment, sur des prestations alternatives (motorisations, niveaux d'équipement, etc.) ou optionnelles. La diversité offerte à travers ce configurateur correspond au nombre de Clio physiquement différentes que le client peut acheter et qui définit potentiellement autant de besoins spécifiques. Cette diversité est impossible à évaluer exactement par ce client car elle n'est pas le fruit de la libre combinaison de l'ensemble des prestations alternatives. Pour des raisons techniques et commerciales, la combinatoire autorisée a été fortement restreinte. Pour le fabricant (autre groupe possible d'observateurs), cette diversité est calculable sans trop de problèmes ; on peut noter que sur un cadre temporel donné, par exemple l'année, seule une partie de cette diversité offerte est mobilisée en production. Dans le sixième exemple, le groupe d'observateurs est un couple arrivant chez un concessionnaire avec l'intention d'acheter une Clio dans un mois au plus, dotée d'une boîte de vitesses automatique et possédant un niveau d'équipement « moyen ». Ces clients potentiels s'intéressent donc à un sous-ensemble de l'ensemble précédent, dont la diversité peut être réduite par une relative indifférence à certains choix offerts, sachant que le choix final peut être influencé par la disponibilité plus précoce de certains véhicules. Ceci illustre la difficulté de définir de manière unique la diversité perçue par des individus.
- Tous les exemples précédents portaient sur des produits finis ; le dernier porte sur un composant de ce produit fini, le moteur³. Le groupe d'observateurs appartient à l'un des services du producteur dont l'une des missions est de « s'occuper » de ce composant (besoins communs) qui est défini par l'ensemble de fonctions qu'il assure (ici, production d'énergie motrice utilisée pour mouvoir un véhicule). Une partition de l'ensemble des moteurs utilisés par Renault en novembre 2013 s'opère facilement sur

³ A ne pas confondre avec le GMP, Groupe Motopropulseur qui combine au moteur un grand nombre de composants comme le démarreur, l'alternateur, la ligne d'échappement, le système de transmission, le système de refroidissement moteur, la boîte de vitesses, etc. Les lignes d'assemblage de Renault approvisionnent des sous-assemblages du GMP dont le moteur fait partie.

la base de la nomenclature des moteurs : tous les moteurs ayant un même numéro de nomenclature sont physiquement identiques et deux moteurs ayant un numéro de nomenclature différent sont physiquement différents. Cette diversité, créée pour répondre à des cahiers des charges fonctionnels (besoins spécifiques) différents, est gérée par ces services techniques. Dans la définition de cet ensemble, le repérage temporel est indispensable, la nomenclature évoluant au cours du temps. Le repérage spatial se rapportant à des usines produisant ou utilisant des moteurs est possible mais ce point de vue est assez conventionnel, aussi peut-on considérer comme virtuel ce cadre spatial. Les remarques faites ici peuvent être généralement reprises pour n'importe quel composant d'un produit manufacturé.

1.3. Positionnement général choisi

Gérer la diversité, c'est à la fois la décrire, la concevoir, la produire, et la vendre. La description de la diversité est une activité transversale à toutes les autres, elle doit même être le support des liens entre ces autres activités (cf. [Figure 2](#)). Comme nous venons de le voir, la diversité est par définition subjective et propre à un groupe d'observateurs. Sa description doit donc inclure tous les points de vue. La littérature sur la personnalisation de masse (Fisher et Ittner 1999, Pil et Holweg 2004, MacDuffie *et al.* 1996) évoque deux types d'observateurs en différenciant la *diversité externe* et la *diversité interne*. Comme nous l'avons déjà rapidement évoqué, la diversité externe représente une « vision client » de la diversité de produits finis commercialisés par une entreprise tandis que la diversité interne évoque une diversité organique de sous-systèmes entrant dans la composition de ces produits finis. La diversité externe se mesure en nombre de produits finis tandis que la diversité interne se mesure en nombre de références de sous-systèmes. La définition de deux diversités fait donc ressortir la notion de *maille* dans la subjectivité de la diversité. Sans être exhaustive, la [Figure 2](#), reprenant la chaîne de la valeur de Porter, liste une partie des tâches que nous regroupons dans l'expression de *gestion de la diversité*.

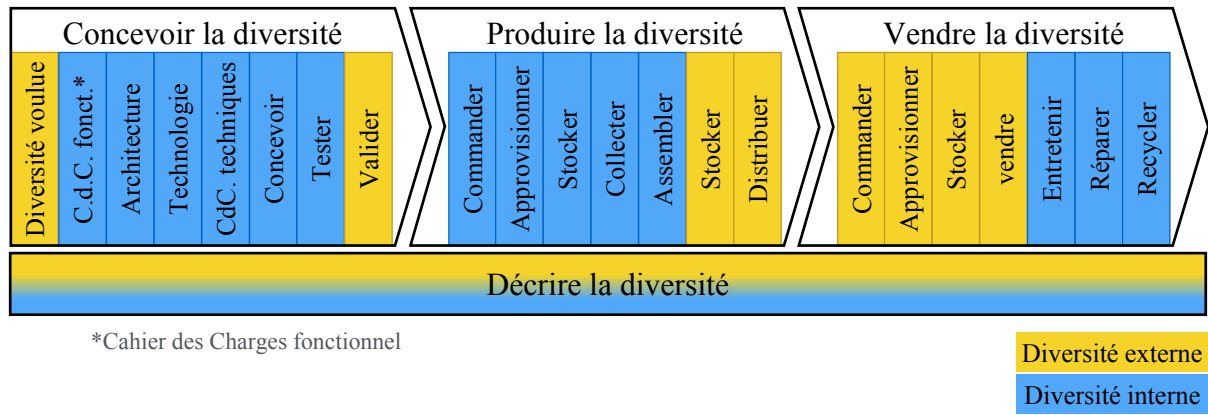


Figure 2 : Les quatre activités macroscopiques de gestion de la diversité externe et interne

Fujita *et al.* (1999) introduisent une notion similaire en distinguant trois types de diversité : la diversité de besoins client, la diversité de fonctions et la diversité de composants. Pour nous, ce découpage macroscopique bien que vrai n'est pas encore suffisant. En effet, notre expérience du terrain nous montre qu'**au sein de la diversité interne de composants, il y a en fait deux mailles**. D'une part, il y a la maille utilisée par la Direction de la R&D et de l'autre, la maille utilisée par la Direction de la production. L'existence de deux mailles traduit des écarts entre les sous-systèmes de plus bas niveaux en conception et en production. Cela arrive lorsque pour assembler un produit, une usine achète un sous-système lui-même issu de l'assemblage de plusieurs composants alors que le bureau d'études conçoit tout ou partie de ces composants. Cela nous pousse à affiner le découpage macroscopique des points de vue en définissant **trois types de diversité** : *la diversité commerciale* (ancienne diversité externe), *la diversité technique de conception* (issue de l'ancienne diversité interne) et *la diversité technique de production* (issue de l'ancienne diversité interne). Les notions de *diversité commerciale* et de *diversité technique* sont des notions déjà utilisées dans la littérature (exemple : Jose Flores, 2005).

D'un point de vue macroscopique, la différence de points de vue génère donc des écarts de maille dans l'analyse de la diversité. **Ces écarts de mailles macroscopiques sont à préciser par la prise en compte d'une dimension spatiale et d'une dimension temporelle de la diversité** (Martin et Ishii, 2000). Ces deux dimensions ne sont pas indépendantes du point de vue choisi. En effet, la dimension spatiale implique un découpage du monde qui d'un point de vue commercial se fait en régions de commercialisation alors que du point de vue de la production, il se fait en sites de fabrication. La conception étant une activité globale à l'entreprise qu'elle soit centralisée ou localisée, la diversité liée à ce point de vue est indépendante de la dimension spatiale. La dimension temporelle implique et affecte les trois

types de diversité parce qu'elles évoluent toutes au fil du cycle de vie des familles de produits. Cette évolution au cours du temps est repérée dans la littérature par le concept de diversité dynamique (Pil et Holweg, 2004) ou de diversité générationnelle (Martin et Ishii, 2000).

La dimension spatiale s'explique par le fait que pour une même famille de produits :

- La diversité commerciale peut être différente entre deux régions commerciales pour tenir compte de préférences locales des clients ou de réglementations locales
- La diversité technique de production peut être différente entre deux sites produisant cette famille pour tenir compte d'une diversité externe différente ou d'un processus de production différent ou d'un parc de fournisseurs différents

La dimension temporelle de la diversité d'une famille de produit se caractérise par :

- Pour la diversité commerciale :
 - o soit par ajout/suppression de nouvelle(s) fonctionnalité(s)
 - o soit par modification du mix de fonctionnalités : par exemple, une fonctionnalité optionnelle (respectivement systématique) peut devenir systématique (respectivement optionnelle) ou plusieurs fonctionnalités liées par des contraintes d'implication (logique de packs) ou d'exclusion (respectivement indépendantes) deviennent indépendantes (respectivement liées par des contraintes)

Différentes causes peuvent expliquer ces évolutions. Par exemple, elles peuvent être dues à un besoin commercial pour relancer les ventes ou à une évolution réglementaire ou bien encore à l'impact d'un changement dans la diversité technique visible du client.

- Pour la diversité technique :
 - o Soit par ajout/suppression d'une référence
 - o Soit par modification mineure de la définition d'une référence ne justifiant pas son remplacement par une nouvelle. Généralement, cela concerne des modifications de matières ou de géométrie ne nécessitant pas d'investissement de production. Ce type d'évolution ne devrait impacter la diversité technique de production que si elle impose un arrêt de l'usage des composants remplacés et une mise au rebut du stock résiduel.
 - o Soit par une modification des combinaisons autorisées de composants. Ce type d'évolution ne devrait impacter la diversité technique de production que si elle change la maille des références réceptionnées.

Différentes causes peuvent expliquer ces évolutions. Par exemple, elles peuvent être dues à un changement de la diversité commerciale, ou à une amélioration de la qualité et/ou du coût de production ou encore à un changement de processus de production.

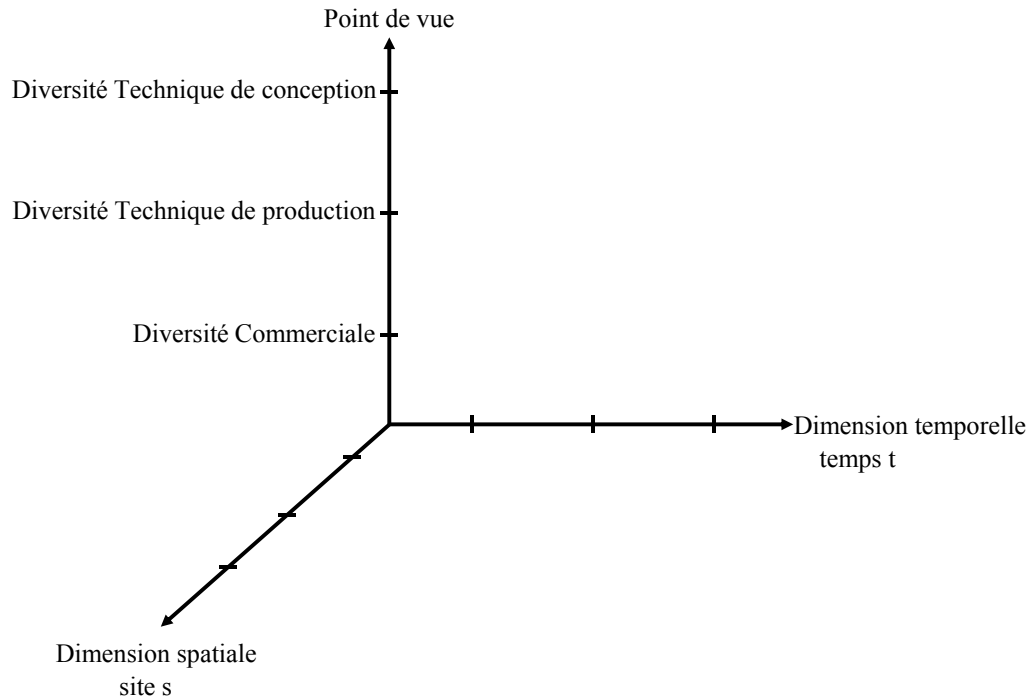


Figure 3 : La diversité : un concept à trois dimensions

Lorsque nous parlerons de **la diversité de produits finis**, nous aurons à l'esprit la diversité commerciale offerte du point de vue du client qui différencie les produits au regard des fonctionnalités qu'ils proposent. Parfois, nous parlerons de **diversité de produits finis fabriqués par une entreprise ou sur une ligne de production**. Ici, la diversité ne s'entendra plus du point de vue du client mais du point de vue de la fabrication, selon lequel deux produits finis seront différents s'ils n'ont pas les mêmes composants identifiés par autant de références. Il existe une différence majeure entre les deux définitions et nous l'évoquerons en détail dans la deuxième partie de cette thèse (chapitre 4, §1).

Le caractère subjectif de la diversité pose des questions sur l'intérêt et la pertinence de son évaluation, sujet pourtant au cœur de nombreux travaux de recherche (Ericsson et Erixon 1999, Mikkola 2003, Salvador, 2007). Hors de notre périmètre d'étude, le point de vue choisi pour mesurer la diversité dans une entreprise peut avoir des impacts majeurs si celui-ci est employé dans la définition d'indicateurs de performance globale. Au niveau opérationnel, l'usage comme indicateur de performance d'un compteur unique de la diversité d'une entreprise impose une coloration de l'indicateur, c'est-à-dire la prédominance d'un point de vue sur les autres.

Dans le cadre du développement de la personnalisation de masse, cet indicateur revêt donc un caractère stratégique souvent sous-estimé.

2. État de la diversité dans le secteur automobile

La diversité comme nous l'avons vue est définie par un point de vue donné. Dans ce paragraphe, nous adopterons deux des trois points de vue macroscopiques que nous venons d'introduire. Le premier est orienté client, tandis que le second est orienté production.

Dans ce paragraphe, nous allons préciser la définition de la diversité dans le secteur automobile et nous allons en faire un état des lieux. Nous proposerons une illustration concrète du cas de Renault au cœur de nos préoccupations et montrerons autant que possible que sa situation n'est pas unique. Dans le §2.1, grâce une vision orientée client, nous tenterons de décrire la diversité commerciale aujourd'hui présente dans le secteur automobile. Dans le §2.2, nous analyserons la diversité technique c'est à dire de sous-systèmes.

2.1. De la diversité de produits finis...

2.1.1. Structuration de la diversité commerciale

Dans le secteur automobile, la diversité de produits est structurée par **segment** et par **famille** de produits. Le **segment** est un découpage macroscopique et commun à l'ensemble des entreprises permettant de classer les produits selon un usage et une longueur du véhicule. La gamme a essentiellement un sens dans l'analyse de marché en marketing. La notion de famille est propre à chaque entreprise et est plus complexe à appréhender. Historiquement, la notion de famille apparaît avec le développement des approches de conception autour des plateformes que l'on peut entendre ici comme l'assemblage d'un certain nombre de composants structurants comme le châssis, les essieux, le bas de caisse, etc. La famille définit un ensemble de produits homogènes pour le marketing (c'est-à-dire visant une clientèle précise par un design, un segment de prix et des fonctionnalités particulières) et qui, par conséquent, peut se caractériser par un grand nombre de composants communs (cf. analyse de littérature Partie III Chapitre 6 §1.3.2.3). Connue du client, la famille est une maille plus fine de découpage de la diversité de produits offerts. En interne à l'entreprise, c'est un découpage de l'offre produits très structurant en termes d'organisation pour les constructeurs automobiles. En effet, à l'instar de Renault, ils ont organisé depuis plus de vingt ans leurs Directions en projets (la conception d'une famille de produits définit un projet) et avec elles leurs Systèmes d'Information (cf. Partie II Chapitre

4 §1). Dans cette thèse, sauf mentions contraires, nous évoquerons implicitement la diversité pour une famille de produits.

En diversité commerciale, nous définissons un produit (i.e. un véhicule) par une « somme » de fonctionnalités. Une fonctionnalité est une notion abstraite à ce stade de la thèse, plus loin, on lui préférera le terme de prestation alternative (cf. Partie II, Chapitre 4 §3.1). Sans entrer dans le détail, une fonctionnalité à un sens pour le client en termes d'usage, de confort, d'agrément ou toute autre plus-value. Le paragraphe qui suit en donne de nombreux exemples. Cette approche entend faire la différence entre deux véhicules dès lors qu'ils n'ont pas les mêmes fonctionnalités ou les mêmes niveaux de service par fonctionnalité.

2.1.2. Evolution de la diversité offerte

Les années soixante sont les années charnières pour l'automobile comme pour d'autres industries. On passe d'une logique de mono produit à une logique de portefeuille de produits. La concurrence fait rage et il devient impératif pour vendre d'analyser et d'anticiper les attentes des futurs clients. Il ne suffit plus de produire en masse un véhicule : c'est le début des logiques de production tirées par la demande, permises aussi par les progrès du marketing et de la statistique. Les années quatre-vingt-dix représentent l'autre grande charnière pour le secteur, c'est l'essor du marketing avec l'hyper-segmentation. On ne fabrique plus des produits basés sur l'innovation technique et stylistique, on base les nouveaux projets avant tout sur des analyses fines du marché, des clients et des futurs besoins. Au niveau organisationnel, c'est l'avènement dans ce secteur de la gestion de projet, chaque nouveau modèle est un projet piloté par le marketing et le commerce qui définissent un cahier des charges à respecter par les autres métiers comme celui de la conception. La concurrence ne s'opère alors plus seulement indépendamment sur chaque segment mais sur la capacité à innover entre les segments voire à en créer de nouveaux. Renault a d'ailleurs tiré son image de marque de cette capacité à déplacer les frontières des segments marketing. De plus en plus de concepts inter-segments (l'Espace, la Kangoo) comme créateurs de nouveaux segments (Twingo, Twizy, Zoe) voient le jour.

Le tableau ci-dessous représente l'évolution des segments depuis les années cinquante. On constate bien un découpage de plus en plus fin du marché.

Tableau 3: Évolution des segments commerciaux automobiles en Europe depuis 60 ans

1950	1970	1990	2010
Familiale	I : Citadine	A : Petite citadine	B0 : Micro urbain
		B : Citadine	A, B1 : Petite citadine
	M1 : Familiale	M1 : Compacte	B : Citadine
		M2 : Familiale	M1 : Compacte
Berline de luxe	M2 : Routière	H1 : Routière	M2 : Familiale
	S : Berline de luxe	H2 : Berline de luxe	H1 : Routière
Utilitaire	VU : Utilitaire	VU : Utilitaire	H2 : Berline de luxe
			VU : Utilitaire

Chaque segment marketing est constitué d'une ou plusieurs familles de produits. Comme nous l'avons définie au §1.3, la famille de produits finis est caractérisée par une cible marketing plus précise. Progressivement, avec l'affinement des méthodes marketing aidées par la technique (statistique, informatique...), la cible marketing a été précisée : c'est l'introduction de la sociologie dans le marketing. La multiplication des familles de produits vise alors à toucher un panel le plus vaste possible de clients exigeants. Une famille est identifiable par un nom (ex : Clio, Megane, etc.). À l'intérieur d'un même segment, les constructeurs différencient notamment leurs familles au regard de la **caisse**. La caisse est la structure, le squelette, la charpente d'une voiture. Il existe aujourd'hui sept grandes catégories de caisses : berline bi-corps (avec hayon arrière), berline tri-corps (type nommé « sedan » en anglais), break (rallongée), coupée, cabriolet, monospace (toit surélevé), SUV (Sport Utility Vehicle, châssis surélevé). Les familles peuvent contenir une (Twingo, Kadjar) ou plusieurs caisse(s) (Megane berline, coupée, cabriolet et break). La combinaison entre caisses et familles de produits d'un segment dépend de la stratégie de chaque marque. Par exemple, Renault a développé la famille Scenic qui était historiquement la caisse monospace de la famille Mégane. De son côté, Volkswagen continue à proposer un monospace au sein de la famille Golf baptisé Golf« sportvan ».

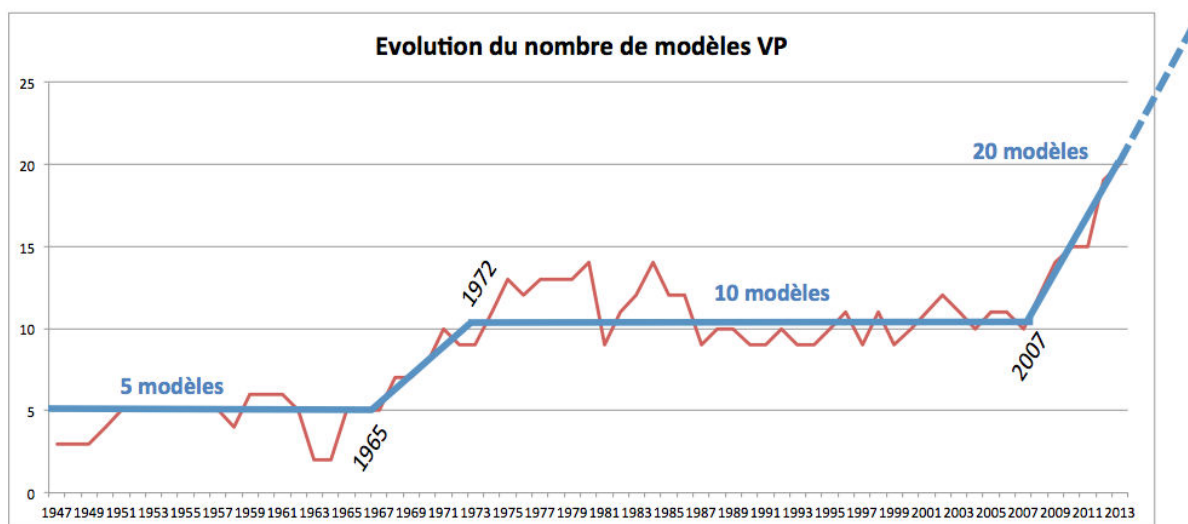


Figure 4 : Évolution dans le temps de la diversité dans la gamme

Au-delà du nom commercial, la famille est structurante d'un point de vue organisationnel puisque chaque famille fait alors l'objet d'un projet spécifique. L'augmentation du nombre de familles pour couvrir plus de besoins clients a vite trouvé ses limites. Le temps de développement d'une famille est trop long, les différences de conception entre les familles posent des problèmes de flexibilité au niveau de l'usine de production. Il faut donc augmenter le nombre de modèles par famille, c'est une démarche que l'on observe à partir des années quatre-vingt. C'est en même temps le développement des plateformes. La plateforme peut se définir comme l'ensemble des composants communs à plusieurs modèles (voir Partie III Chapitre 6 §1.3.2.3 pour une définition plus précise de la plateforme). Si historiquement la plateforme définissait la famille, aujourd'hui les plateformes dépassent largement le cadre des familles (ex : Clio IV & Captur), des marques (ex : Kadjar et Qashqai) et même des groupes (ex : Twingo, Smart For Four et For Two). La vision plateforme permet de développer des produits ayant suffisamment de fonctionnalités communes pour être conçus en moins de temps et fabriqués sur une même ligne de montage. La diversité exigée aujourd'hui fait sentir les limites des visions plateformes classiques. Comme nous le verrons dans la troisième partie de cette thèse, la vision modulaire est l'une des démarches pour les dépasser.

2.1.3. État de la diversité de produits finis

2.1.3.1. Analyse de la diversité commerciale Renault offerte en France au 1er Janvier 2013

Intéressons-nous maintenant en détail au configurateur français⁴ de la Twingo (au 1er janvier 2013). De façon globale, le configurateur est structuré sur quatre onglets : l'esthétique intérieure

⁴ Nous détaillerons plus loin la variabilité spatiale

et extérieure, le niveau d'équipement, la motorisation et les options. Nous comptabilisons alors 10 teintes de carrosseries, 2 harmonies intérieures, 10 jeux de stickers, 8 niveaux d'équipement, 6 motorisations, 2 transmissions et plus de 50 options (dont certaines en packs). À partir de ce constat, une détermination du nombre de véhicules configurables n'est a priori pas facile à faire (Pil et Holweg 2004, Behr 2004). En effet, la population de véhicules commercialisables n'est pas le produit cartésien de la diversité de chaque item de choix. Il existe des contraintes entre les items. Comme nous allons l'illustrer, tout choix que le client réalise sur le configurateur réduit la taille de la population visée, le but étant bien en sortie de cibler le véhicule le plus proche possible des besoins du client. Le client peut voir en temps réel les choix déjà effectués et les options non compatibles avec ceux-là (pictogrammes). L'ordre de détermination de ces restrictions n'est pas imposé, tout au plus l'ordre des onglets et des items par onglet en suggère un.

De façon concrète, l'onglet **niveaux d'équipement** offre 8 niveaux d'équipement : Access, Expression, Authentique, Dynamique, Gordini, Initiale, RS, Gordini RS. L'onglet **Motorisation** définit lui, le choix des combinaisons autorisées de **niveaux de motorisation** 4 moteurs à essence (1,2 16V 75 Eco ; 1,2 16V 75 BVR5 ; 1,2 16V 100 ; 1,6 16V 133) et 2 moteurs diesel (dCi 75 éco ; dCi 85 éco) et de **transmission** (manuelle⁵ et automatique). Dans le tableau suivant, nous avons noté par des « X » les combinaisons licites entre les types de transmission et les types de motorisation. Dans celui d'après, nous avons croisé les motorisations et les niveaux d'équipement. Ces restrictions sont le fruit de contraintes commerciales mais aussi sans doute de contraintes techniques. Il semble acceptable que toutes les transmissions ne soient pas compatibles avec tous les moteurs, en particulier ici la diversité transmission automatique semble nécessiter une motorisation spécifique.

⁵ On ignore totalement ici le fait que cela soit la même boîte pour les 5 moteurs concernés

Tableau 4 : Illustrations des restrictions de combinaisons entre deux items dans le configurateur français de la Twingo

			Transmission (FR)	
			Manuelle	Automatique
			BM	BVR ⁶
Motorisation (FR)	Essence	1.2 16V 75 Eco	X	-
		1.2 16V 75 BVR5	-	X
		1,2 16V 100	X	-
		1.6 16V 133	X	-
	Diesel	dCi 75 éco	X	-
		dCi 85 éco	X	-

Motorisation (FR)	Transmission	Niveau d'équipement (FR)							
		Access	Expression	Authentique	Dynamique	Gordini	Initiale	RS	Gordini RS
1.2 16V 75 Eco	BM	X	X	X	X	-	X	-	-
1,2 16V 75 BVR5	BVR	-	-	-	X	-	X	-	-
1,2 16V 100	BM	-	-	-	-	X	-	-	-
1,6 16V 133	BM	-	-	-	-	-	-	X	X
dCi 75 éco	BM	-	X	X	X	-	-	-	-
dCi 85 éco	BM	-	-	-	X	X	X	-	-

L'onglet options et accessoires est structuré sous six rubriques : Présentation extérieure ; Multimédia ; Transport et protection ; Confort ; Extérieur ; Intérieur. Parmi la cinquantaine d'options, un certain nombre relèvent d'éléments indépendants comme les coques de rétroviseurs ou les accessoires (tapis de sol, filet de coffre, barres de toit...). Ces éléments peuvent être gérés simplement de façon synchrone et sont même parfois montés en concession. Aussi généralement, le niveau d'équipement retenu définit quelques-unes de ces options (en les déclarant « de série ») et permet de définir une montée en gamme cohérente avec des tranches tarifaires interdisant quelques autres options. Par exemple, la *climatisation* passe de série à partir du troisième niveau d'équipement, les options *toit panoramique* et *rétroviseurs dégivrants* sont exclues des trois premiers niveaux d'équipement. La logique de packs (implication symétrique forte entre au moins deux options) est aussi visible dans le configurateur. Par exemple, on ne peut pas choisir les *airbags rideaux arrières* sans accepter le *contrôleur électronique de trajectoire*. Ce n'est pas toujours le cas, par exemple, l'*aide au stationnement* est compatible avec tous les niveaux d'équipement. Ces choix contraints sont le

⁶ Pour Boîte de Vitesses Robotisée

reflet de politiques commerciales de segmentation et de différenciation par rapport à la concurrence.

L'analyse de ce configurateur montre finalement que la diversité offerte est largement réduite par des contraintes commerciales et techniques. Cette analyse externe ne permet pas de trancher de façon certaine sur le caractère commercial ou technique de chaque contrainte. Malgré ces contraintes, nous sommes forcés de constater qu'alors que la Twingo est un véhicule à faible diversité chez Renault, le nombre de véhicules différents disponibles à la vente en France à la date du 1er janvier 2013 est très important. Sans compter ni les stickers, ni les accessoires, on arrive à plus de 1,3 million de véhicules différents [=10(teintes)*2(harmonies intérieures)*16(motorisations x niveaux d'équipement)*2¹² (hypothèse de 12 options compatibles ayant chacune 2 possibles)] pour la France.

2.1.3.2. Dimension spatiale de la diversité automobile

Pour étudier la variété des configurations possibles induites par le pays de distribution, on se limitera à comparer le configurateur Twingo allemand avec le français. Une première analyse rapide montre que l'offre allemande est inférieure à la variété française. À titre d'exemple, le tableau ci-dessous reprend la même forme que le [Tableau 4](#), on constate qu'il y a un moteur en moins et trois niveaux d'équipement en moins.

Tableau 5 : Illustration des restrictions de combinaisons entre deux items dans le configurateur allemand de la Twingo

Moteur (De)	Boîte	Niveau d'équipement (De)				
		Expression	Liberty	Dynamique	Gordini	Gordini RS
1,2 16V 75 Eco	BM	X	X	X	-	-
1,2 16V 75 BVR5	BVR	-	-	X	-	-
1,2 16V 100	BM	-	-	-	X	-
1,6 16V 133	BM	-	-	-	-	X
1,2 16V 75 Eco Drive	BM	-	X	X	-	-
dCi 85 éco	BM	-	-	X	-	-

Avec l'étude des motorisations et des niveaux d'équipement allemands, on constate qu'une motorisation diesel a été remplacée par une motorisation essence. Deux raisons peuvent expliquer cela : soit une différence de besoins entre ces deux marchés, soit une différence législative (norme de dépollution...) entraînant une diversité de contraintes techniques. Les informations visibles du client ne permettent a priori pas de trancher.

La comparaison des options disponibles montre quelques différences aussi. Certaines options disponibles en France ne le sont pas en Allemagne (radars de recul ou frontaux par exemple). Il est intéressant de noter aussi qu'à l'inverse, certaines options disponibles pour le marché

allemand ne sont pas proposées sur le marché français (par exemple toit en toile). Si la diversité offerte sur le marché allemand est inférieure à la diversité offerte sur le marché français, nous ne pouvons pas dire que la diversité allemande est un sous-ensemble de la diversité française. Le graphique ci-dessous (obtenu avec des données internes à Renault) représente la diversité pour la Twingo des couples Motorisation/Niveaux d'équipement ; il montre bien cette diversité géographique de l'offre. La Figure 5 illustre bien la complexité d'une analyse de la diversité commerciale globale depuis un point de vue externe.

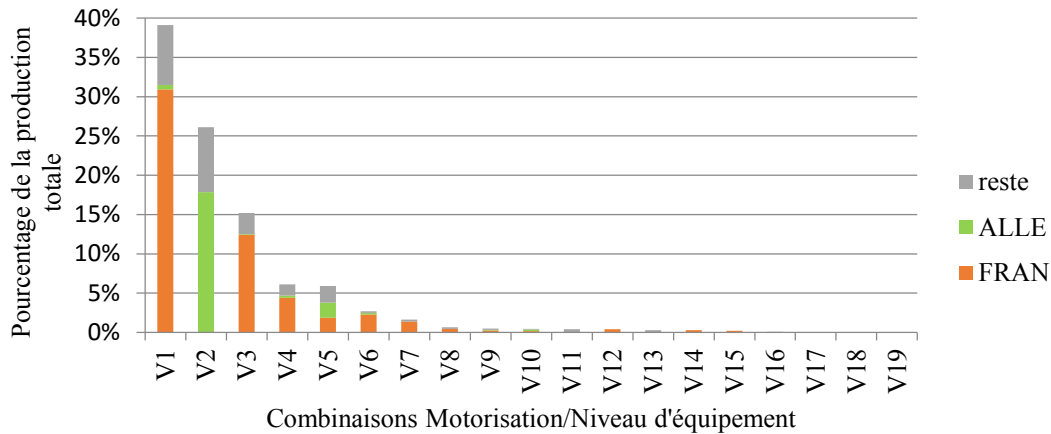


Figure 5 : Répartition de la production de Twingo en 2013 en fonction des combinaisons Motorisation/Niveau d'équipement et du pays de destination

Cette diversité spatiale est parfois imposée. Même si l'ensemble des options disponibles pour le marché français était le même que pour le marché britannique, le côté de conduite différent amène implicitement à définir une diversité fabricable contenant à la fois la population des véhicules destinés au marché français et la population des véhicules destinés au marché anglais. Le marché anglais, du fait de la spécificité du côté de conduite n'a donc aucun véhicule fonctionnellement identique avec le marché français. Cette différenciation du produit n'est pas à proprement parlé un choix offert au client, il s'impose à lui de manière implicite en fonction de sa situation géographique, mais c'est une source de diversité dans la fabrication. D'autres critères que l'on peut qualifier de technico-législatifs, à l'instar du côté de conduite, sont une source importante de différenciation des produits fabricables. Parmi eux, on retrouve par exemple la norme antipollution, le type de climat (température et taux d'humidité extrêmes), le niveau de qualité des routes, le taux de poussière dans l'air. Tous ces critères ont un impact sur la diversité des produits fabriqués. À la différence du côté de conduite où les deux variantes sont nécessaires, la diversité fonctionnelle induite par la plupart de ces critères technico-législatifs est le fruit d'une optimisation du coût de revient unitaire au détriment de la

complexité générée par une augmentation de la diversité de produits. À l'inverse, un constructeur pourrait faire par exemple le choix de réduire la diversité de produits à fabriquer en ne produisant que des véhicules respectant les contraintes les plus drastiques en termes de norme antipollution. Cette logique implique de standardiser systématiquement la variante la plus exigeante. Un certain nombre de constructeurs automobiles à l'instar de Renault et de Ford réclament d'ailleurs une uniformisation des règles environnementales entre les pays du monde. Les entreprises ont besoin de définir un outil d'arbitrage économique global pour choisir la meilleure stratégie ; c'est l'objet de la Partie IV (cf. [page 191](#)) de cette thèse.

2.1.3.3. Dimension temporelle de la diversité automobile

Tout ce qui précède porte sur les combinatoires possibles à un instant t . Mais comme nous l'avons décrit de manière générique au §1.3, cette diversité est fonction du temps puisque, par exemple, une fonctionnalité optionnelle une semaine peut être de série la semaine d'après. Cet aspect dynamique de la diversité commerciale, bien visible en comparant l'offre commerciale à deux dates différentes, est d'une complexité redoutable dans la traçabilité et le suivi dynamique des données utilisées dans de nombreux systèmes d'information (outil de tarification, outil d'estimation du délai client, configurateur, catalogue, outil de planification de la production et des approvisionnements, outil de gestion des pièces de rechange, outil de gestion de la documentation technique pour les centres de réparation, etc.). De la même façon, la dynamique de la diversité technique est très importante (chaque mois, plusieurs milliers de modifications sont émises par la Direction de la R&D). Cette dimension temporelle de la diversité technique nécessite aussi une grande attention dans les activités de description. En effet, un manque d'exhaustivité et d'exactitude dans les nomenclatures de production peut conduire à de coûteuses perturbations dans la production des véhicules (absence de pièces, doublons, mauvaises pièces, etc.).

2.1.4. Diversité offerte versus diversité produite

Dans le cadre de la personnalisation de masse, la volonté marketing des constructeurs automobiles est clairement de proposer l'étendue la plus large possible de configurations aux clients pour couvrir un maximum de besoins différents. En tout cas, tel est le sentiment que les constructeurs cherchent à développer chez les consommateurs car même si la diversité offerte est très grande, elle reste finie. La personnalisation ici n'est donc pas à entendre comme du sur-mesure ou même de la demi-mesure (diversité offerte théoriquement infinie), en tout cas pas pour les marques dites généralistes (Chrysler, Chevrolet, Ford, Fiat, Volkswagen, Skoda, Renault, Nissan, Toyota, Hyundai, Peugeot, Citroën, etc.). Seules quelques marques de luxes,

caractérisées par des coûts de revient importants et des volumes de ventes très faibles sortant donc de la production de masse, peuvent aujourd'hui prétendre à une offre sur-mesure. Néanmoins, la possibilité de personnalisation est telle aujourd'hui qu'elle aboutit à un nombre de combinaisons possibles, et donc de véhicules fabricables (dizaines de millions), supérieur au nombre de véhicules différents fabriqués durant la totalité du cycle de vie du modèle (centaines de milliers). L'ensemble de la diversité fabricable ne sera donc pas produite. À titre d'exemple, Renault a vendu en France sur toute l'année 2013 environ 46 000 Twingo (particuliers et entreprises confondus) alors que la diversité offerte dans ce même pays dépassait les 1,3 million de produits différents (cf §2.1.3.1). Ce constat n'est pas propre à Renault comme l'ont déjà mis en avant Pil et Holweg (2004, cf. [Tableau 6](#)).

Tableau 6 : Diversités commerciales versus volumes de ventes sur le marché automobile européen en 2002

Modèle	Caisses	Motorisations	Combinaisons de Peintures et de niveaux d'équipement	Options montées en usines (avec ou sans)	Nombre de combinaisons	Volume de vente en Europe en 2002
Peugeot 206	3	8	70	5	53 760	596 531
VW Golf	3	16	221	26	711 890 829 312	595 465
Ford Focus	4	11	64	19	1 476 395 008	523 356
Renault Clio	2	10	57	9	583 680	502 497
Peugeot 307	4	8	70	9	1 146 880	441 468
GM Astra	4	11	83	14	59 834 368	440 567
GM Corsa	2	9	77	17	181 665 792	420 296
Fiat Punto	2	5	51	8	130 560	416 843
VW Polo	2	9	195	27	471 104 225 280	357 539
BMW 3-Series	3	18	280	45	531 987 705 983 140 000	350 723
Ford Fiesta	2	5	57	13	4 669 440	294 360
Renault Megane	2	6	52	14	10 223 616	261 383
Mercedes C-Class	2	16	312	59	5 755 384 150 997 380 000 000	254 836
Toyota Yaris	2	6	30	8	92 160	194 256
Fiat Stilo	3	7	93	25	65 531 805 696	173 453
Mercedes E-Class	2	15	285	70	10 094 058 357 133 900 000 000 000	157 453
Toyota Corolla	4	5	24	6	30 720	139 837
Nissan Micra	2	6	30	4	5 760	106 428
Mini (BMW)	1	5	418	44	36 767 668 832 829 400	105 617
Nissan Almera	3	5	30	5	14 400	87 474

L'un des enjeux principaux de la personnalisation de masse est lié à la variabilité de la demande, (c'est-à-dire pour rappel, le taux de vente par produit fini différent). Certaines entreprises du secteur ont alors cherché à réduire la variabilité de la demande tout en offrant une personnalisation importante. Dans le secteur automobile, la concentration de la production sur une faible portion de la diversité offerte est permise par une organisation commerciale particulière (Behr 2004). En effet, pour limiter la variabilité dans la production, certains constructeurs comme Renault exploitent le morcèlement en entités différentes de leur chaîne de

distribution en aval des usines de carrosserie montage. Une bonne partie de la diversité à produire ne résulte donc pas d'une personnalisation d'un client final mais de l'achat anticipé donc plus standard (pour minimiser les risques d'invendus) d'une société de distribution. Comme le souligne Behr (2004), la relation d'exclusivité liant les concessionnaires et le Groupe en charge de la production permet au producteur d'imposer des horizons de carnet de commandes suffisamment importants pour minimiser l'impact de l'incertitude de la demande sur la planification de la production et des approvisionnements. Cela revient en fait à répartir les risques d'une production pour stock entre le fabricant et le réseau de distribution en pilotant le point de pénétration de commandes. Le client final est donc incité (généralement par une réduction du prix) à choisir non plus le véhicule qu'il désire précisément mais le véhicule le plus proche en termes de fonctionnalités déjà présent dans le stock du réseau ou déjà commandé par le réseau. Finalement, un client souhaitant acquérir un véhicule personnalisé doit accepter un délai d'attente.

En effet, parmi l'ensemble des produits fabriqués, il faut distinguer :

- Les produits qui sont commandés et choisis par des acheteurs professionnels. Cela représente entre 30 et 70% des volumes de production en fonction des modèles. Cette catégorie est stratégique pour les constructeurs aujourd'hui puisque la diversité y est moindre car négociée dans un contrat global avec des acheteurs professionnels. On y retrouve :
 - Les voitures commandées par des flottes (loueurs, pools d'entreprises)
 - Les voitures commandées par des services d'État (pompier, police, gendarmerie, armée, etc.)
 - Les voitures commandées par des entreprises pour leurs cadres dirigeants que ces derniers aient ou non une possibilité de choisir leur véhicule
- Les produits commandés pour le stock par des concessionnaires du réseau du constructeur comme des concessionnaires multimarques (importateur par exemple). Dissociés de commandes fermes d'un client final (utilisateur), ces volumes de productions sont nécessairement moins diversifiés pour minimiser les risques de stocks dormants et/ou d'obsolescence. Cela représente entre 20 et 50% de la production en fonction des familles.
- Les produits commandés par des clients en concession et qui les ont personnalisés à leur convenance. Ce type de commandes unitaires et complètement personnalisées est source d'une grande diversité de produits fabriqués. Cette catégorie représente entre 10 et 30%

des volumes de production en fonction de la famille. Ce faible taux, même en Europe, s'explique à la fois par le délai proposé pour ce type de produits (qui peut atteindre quatre à six mois pour des familles de produits à succès) et la moindre disposition des concessions à accorder des gestes commerciaux.

- Les produits non commandés au moment de leur production et qui sont donc produits pour le stock directement du constructeur. Ces véhicules issus purement de prévisions du fabricant ont une diversité qui dépend directement de la méthode de prévision employée. En fonction du succès commercial d'une famille et de la fluctuation de la demande, cette catégorie représente une part non négligeable des volumes de production.

Cette organisation de la distribution conduit à réduire la variabilité à produire (i.e. commandée). Le graphe suivant montre la répartition de la production de Twingo en 2013 à la maille de la version commerciale (VC). La version commerciale est une combinaison des choix les plus structurants : la motorisation et le niveau d'équipement. À cette maille, la dispersion des volumes n'est pas homogène sur les 121 versions commerciales, et forme une quasi parfaite loi de Pareto ce qui tend à montrer une variabilité réduite à cette maille. À la maille plus fine du produit fini (incluant la couleur, l'ambiance intérieure, les jantes, les diverses options, etc.), la variabilité à fabriquer reste forte.

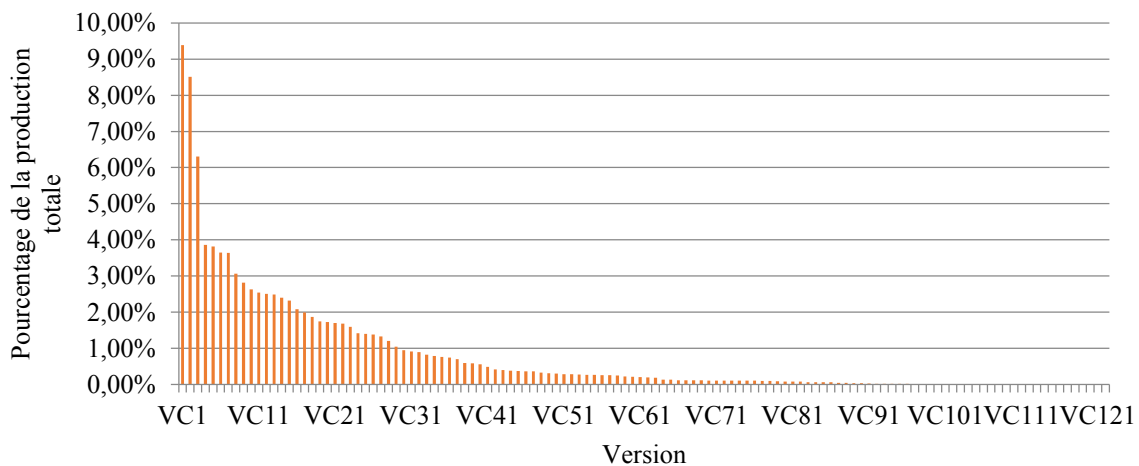


Figure 6 : Répartition de la production totale de Twingo en 2013 en fonction des versions

Finalement, la diversité globale pour un modèle donné est donc très importante. Elle est difficilement mesurable de l'extérieur parce qu'elle dépend d'un certain nombre de découpages dont l'observateur (généralement le client) est plus ou moins conscient ; c'est le cas du pays par exemple. Définir de l'extérieur la diversité offerte à un client n'a donc de sens que si on définit au moins un cadre spatio-temporel clair.

Heureusement, la diversité en nombre de produits finis s'obtient à partir d'une combinatoire de composants en nombre beaucoup plus restreint. La diversité en entrée est donc nettement inférieure à la diversité en sortie de l'usine d'assemblage final. Dans le paragraphe suivant, nous allons essayer de décrire la diversité de composants nécessaires à l'assemblage de l'ensemble de ces produits finis différents.

2.2. ... À la diversité de composants

2.2.1. Structuration de la diversité technique

Ici, un produit est défini par sa composition. Deux véhicules sont alors différents dès lors qu'ils ne sont pas faits à partir des mêmes composants. Du point de vue de la production, la diversité s'obtient sur une ligne d'assemblage par la combinaison de composants optionnels ou alternatifs, à laquelle s'ajoutent quelques rares opérations physiques directes de différenciation (peinture, etc.). Un **Composant Alternatif**⁷ (CA) correspond à l'une des variantes d'un **Ensemble de Composants Alternatifs** (ECA) susceptibles d'être montées dans un même poste d'une ligne d'assemblage. Un composant optionnel (barres de toit, radars de recul, ordinateur de bord, etc.) est un cas particulier de composant alternatif d'un ECA décrivant seulement la présence ou l'absence du composant optionnel ; l'alternative implicite à la variante optionnelle peut être un objet physique (bouclier sans radar de recul...) ou rien du tout (absence de barre de toit, absence d'ordinateur de bord). Dans la suite, on ne parlera que de CAs et d'ECAs, puisque ces concepts permettent de traiter également le cas de composants optionnels. Comme nous l'avons déjà évoqué, pour une famille donnée, les produits finis intègrent également un ensemble de composants systématiquement montés qui ne génère pas de diversité supplémentaire. Ceci conduit à distinguer deux catégories de composants, ce que la [Figure 7](#) schématise à partir d'un exemple de quelques ensembles de composants alternatifs.

⁷ Un CA ne tient pas compte du coefficient de montage, c'est une référence dans la nomenclature.

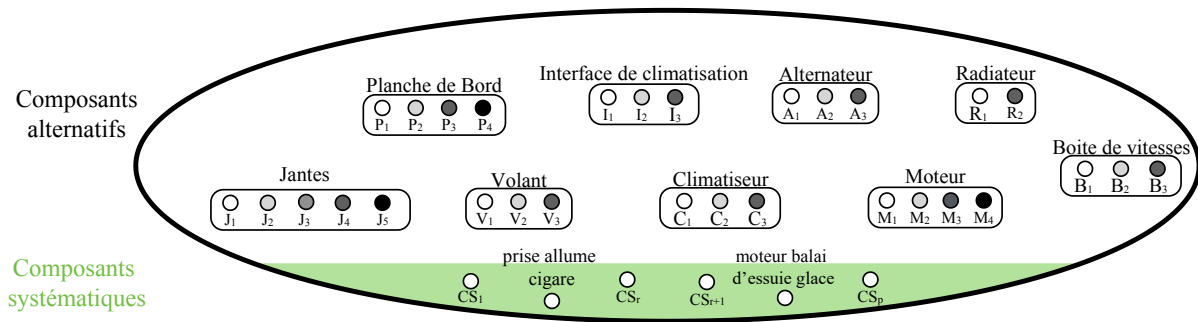


Figure 7 : Illustration de quelques composants utilisés dans une production de masse fortement diversifiée

2.2.2. État de la diversité de composants

2.2.2.1. Analyse de la diversité technique de la Clio IV en 2013 à l'Usine de Flins

Sans tenir compte du coefficient de montage, l'assemblage final d'un véhicule comme une Clio IV demande plus de 1 600 **composants différents** (quatre roues = un composant, des centaines de vis identiques = un composant). De ces 1 600 composants, environ la moitié est commune à l'ensemble des véhicules de la famille Clio IV, peu importe la personnalisation retenue par le client. On parlera de **composants systématiques** dans la suite de cette thèse. Pour les autres composants, les choses sont plus complexes. Disons pour le moment qu'ils sont conditionnés par un ou plusieurs choix que l'acheteur fait explicitement ou implicitement lors de la passation de commande. Nous formaliserons plus tard ce lien (cf. Partie II, Chapitre 4 §3.1). Au final, les usines d'assemblage doivent gérer chacune environ 6 500 **références** de composants pour couvrir la diversité commerciale totale de cette famille.

Du point de vue de la Direction de la R&D, pour l'ensemble de la gamme c'est officiellement plus de 85 000 références qui sont gérées chez Renault. Cette diversité a un lourd impact sur les développements, les prévisions, les flux, les emballages, les stocks, les systèmes informatiques, la gestion des pièces de rechange pour le Service Après-Vente (SAV).

2.2.2.2. Dimension spatiale de la diversité technique de production

La Clio IV est une famille de produits fabriquée dans deux Usines de Carrosserie Montage (UCM) différentes (Flins et Bursa). Ces deux UCMs n'assemblent pas les mêmes ensembles de composants. Cela s'explique par différentes raisons.

- D'abord, la diversité commerciale couverte par chaque UCM n'est pas la même.

- Soit, les moyens installés ne permettent pas de fabriquer les véhicules ayant certaines fonctionnalités. C'est le cas de l'UCM de Flins qui n'assemble pas les Clio IV Estate par exemple.
- Soit, il y a une répartition par UCM de toutes ou partie des régions commerciales, ce qui implique une diversité couverte dès lors que les régions commerciales ne proposent pas les mêmes ensembles de produits finis. On peut imaginer par exemple que seul l'UCM de Bursa soit en charge de l'assemblage des produits destinés aux marchés imposant la conduite à droite.
- Ensuite, le processus de production des deux usines peut induire des mailles différentes de composants achetés. On peut imaginer par exemple que l'assemblage de la ligne d'échappement est réalisé par l'UCM de Flins qui achète donc des composants de cette ligne tandis l'UCM de Bursa achète directement la ligne d'échappement.
- Enfin, des écarts dans le parc fournisseurs des deux UCMs peuvent conduire à des écarts dans la diversité de composants approvisionnés. Par exemple, il est possible qu'un fournisseur retenu pour l'UCM de Bursa pour sa proximité géographique ne maîtrise pas une technique particulière de production. Cela peut conduire à un ajustement du cahier des charges spécifiquement pour la référence approvisionnée par cette UCM.

Il est important de noter que pour une ligne d'assemblage final, sous le terme générique de composants se trouvent des objets de diverses natures : de l'écrou au moteur assemblé en passant par les liquides (huile, lave-glace...). Certains de ces composants sont donc eux-mêmes le fruit d'un assemblage de parfois plus de 250 sous-composants (c'est le cas des moteurs fabriqués dans d'autres usines du Groupe). L'étendue de la diversité gérée par les usines d'assemblage dépend donc intimement de la définition de la chaîne logistique (arbitrage entre internalisation et externalisation de la production de sous-assemblés).

2.2.2.3. Dimension temporelle de la diversité technique de production

Là aussi, la diversité de composants utilisés pour une famille de produits peut varier au cours du temps pour au moins deux raisons. D'abord, le rajeunissement d'une gamme peut conduire au remplacement de certains composants alternatifs. Ensuite, certains CAs peuvent être remplacés par d'autres pour des raisons d'optimisation de coût ou de qualité. La diversité de composants dépend donc aussi d'une dimension temporelle. À titre d'illustration, la Direction R&D de Renault génère mensuellement plusieurs milliers de modifications des composants nécessaires à la fabrication des voitures.

La personnalisation d'un nombre toujours plus grand de fonctionnalités augmente encore de manière considérable le nombre de références gérées par les usines lors de l'assemblage. En effet, la personnalisation passe par le choix d'un élément parmi un panel, chaque alternative ayant des pièces spécifiques, cela multiplie d'autant le nombre total de références. Un des objectifs de cette thèse (Partie III et Partie IV) est d'étudier ce lien entre la diversité technique et la diversité commerciale.

2.2.3. Difficultés particulières de la diversité technique automobile

La diversité technique automobile est importante mais les difficultés opérationnelles de sa gestion ne sont pas seulement dues à un nombre important de références (la grande distribution aurait alors encore plus de problématiques). En effet, la diversité technique automobile se caractérise par une interdépendance forte des composants. Cette interdépendance est de deux natures. D'abord, un produit fini particulier nécessite l'assemblage d'un grand nombre de composants ce qui rend dépendante la gestion de ces composants. De plus, chaque composant assemblé est souvent lui-même le résultat d'un assemblage. Ensuite, indépendamment des produits finis, il existe des contraintes à la libre combinaison de ces composants qui complexifient aussi leur gestion.

Par exemple, le fait que pour assembler un produit fini un grand nombre de références soit nécessaire augmente l'exigence nécessaire en termes de qualité et de respect des délais de livraison pour chacun des composants. En effet, la production peut être arrêtée par une rupture de stock d'un seul composant parmi les milliers nécessaires. De même, si le taux de défauts qualités des produits finis résulte de la combinaison des taux de défauts de ces composants, l'exigence Qualité par composant doit être très haute (1500 composants à 0,01% de taux de défauts conduit à seulement 86% de chance de fabriquer un véhicule sans composants défectueux).

L'existence de contraintes entre composants augmente la complexité de la gestion de la diversité de composants, notamment sa description dans les nomenclatures. La diversité technique revêt alors une complexité proportionnelle au nombre de contraintes inter-composants. Les contraintes entre composants sont de deux types.

- Les contraintes entre composants peuvent être le fruit des contraintes fonctionnelles. Nous avons vu dans la section précédente une partie de ces contraintes au travers du configurateur. Ces contraintes peuvent être commerciales ou réglementaires (pour des questions de normes comme la dépollution ou le côté de conduite). Les contraintes commerciales ont pour but de rendre cohérente la montée en gamme d'un modèle et

d'éviter la cannibalisation entre les modèles de la gamme. Elles peuvent exprimer une logique de pack (association obligatoire de prestations) ou d'exclusion. Les contraintes réglementaires, elles, traduisent des écarts dans les exigences techniques (norme de dépollution, côté de conduite, etc.) entre les régions.

- Les contraintes entre composants peuvent être le fruit de contraintes techniques et technologiques. Elles sont alors le fruit de contraintes d'interfaçages ou de compatibilité en termes de performance plus ou moins complexe.

La Figure 8 complète la Figure 7 en mettant en évidence le rôle respectif des contraintes commerciales et techniques.

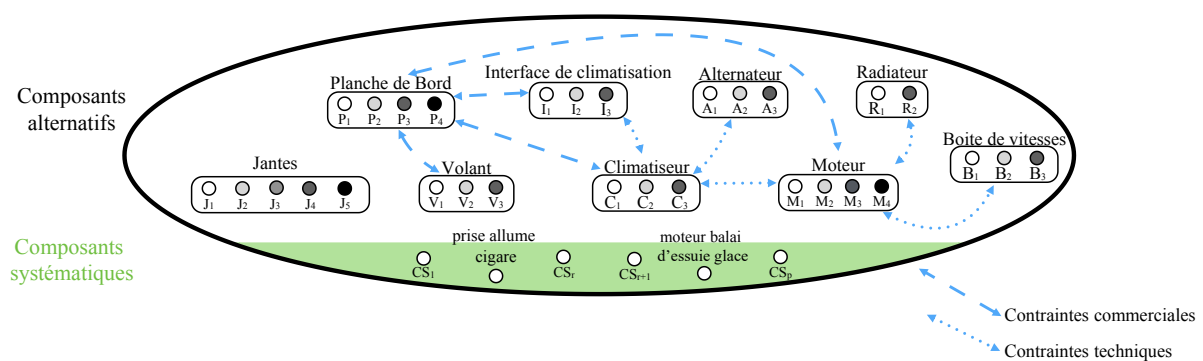


Figure 8 : Mise en évidence de contraintes techniques et commerciales entre ECAs

Conclusion de la Partie I

La diversité est une notion contingente associée à un point de vue. Dans une entreprise manufacturière donnée, nous définissons trois points de vue différents : celui de la Direction Commerciale et du client, celui de la Direction de la R&D et celui de la Direction de la Production. Ainsi de manière générale, nous définissons la Diversité Commerciale, la Diversité Technique de conception et la Diversité Technique de production. La mesure de la diversité ne pouvant se faire que dans un point de vue donné, la question de la définition d'un indicateur global de diversité qui anime un certain nombre de travaux académiques nous semble d'un intérêt limité sur le terrain. Une partie de notre travail s'est focalisé sur cette notion de point de vue. En effet dans la Partie II (p71), nous nous demanderons comment représenter un produit fini par une nomenclature qui peut satisfaire tous les utilisateurs ayant des points de vue différents ?

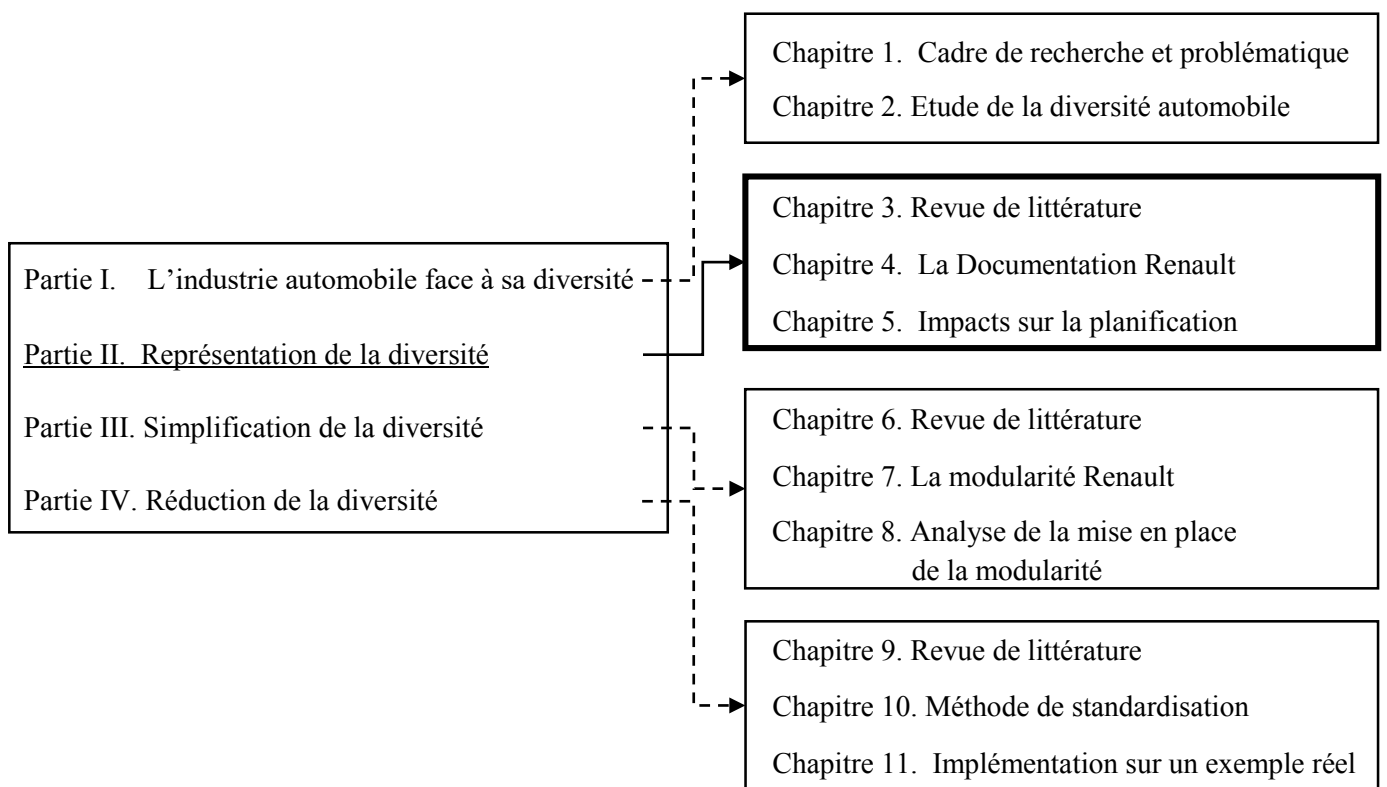
La diversité de produits finis proposés aux clients n'a fait qu'augmenter dans le secteur automobile depuis le début de la production de masse. Le modèle de pensée de la Ford T a laissé la place à de plus en plus de possibilités de choix par le client, jusqu'à atteindre aujourd'hui une personnalisation de masse. La diversité commerciale étant si importante dans le cadre de la personnalisation de masse, les constructeurs automobiles ont exploité l'organisation de leur chaîne de distribution pour limiter la variabilité à produire (la diversité commandée). La variabilité à produire reste malgré tout très importante dans le secteur automobile.

Cette diversité commerciale ne sera pas remise en cause et sera considérée comme acquise dans la suite de cette thèse. Pour autant, l'hypothèse selon laquelle cette diversité est nécessaire mériterait d'être remise en cause (Stäblein *et al.* 2011).

La diversité technique de composants à laquelle doivent faire face les chaînes logistiques des constructeurs automobiles résulte de cette diversité de produits finis à fabriquer. Ce lien systématique sera d'ailleurs l'objet de notre étude dans la Partie III (cf. p133). La particularité du secteur automobile relève de la complexité de cette diversité technique. Cette complexité vient à la fois du nombre de composants alternatifs et de leur interdépendance (Mtopi Fotso, 2006). Cette interdépendance est due à la fois au fait qu'un grand nombre de composants soit nécessaire pour fabriquer un produit fini mais aussi au fait qu'il existe un grand nombre de contraintes à la libre combinaison des composants alternatifs.

Même si le coût de la diversité reste difficilement mesurable, il fait l'unanimité (Pil et Holweg 2004, Fisher et Ittner 1999, MacDuffie *et al.* 1996, etc) que cette diversité a un impact majeur sur la performance économique des entreprises manufacturières (en termes de cadence et de qualité et donc de coût et de délai). De façon macroscopique, cela reste visible par la marge opérationnelle qui reste inférieure à 10% et parfois même à 5% du chiffre d'affaires dans le secteur automobile. Dans ce secteur, une grande partie de ces coûts sont induits par le nombre très important de contraintes entre composants. De façon opérationnelle, ces contraintes rendent difficile la définition de nomenclatures. Aussi, pour limiter l'inflation de la diversité de composants à gérer, les fabricants doivent améliorer sans cesse leurs processus de conception et de production. Une amélioration possible des processus de conception passe alors par la définition de nouvelles architectures des produits visant à réduire ces contraintes. Cette simplification de la diversité est un enjeu majeur pour la chaîne logistique et la gestion de production. L'architecture modulaire des produits, que nous étudierons dans la Partie III de cette thèse, s'inscrit dans cette démarche de simplification de la diversité. Enfin, parce que la diversité de composants peut aussi résulter d'une vision locale des enjeux de diversité en phase de conception, la Partie IV nous permettra de proposer une méthode de standardisation basée sur une vision économique globale de la diversité invisible du client.

Partie II. Représentation de la diversité : structuration des nomenclatures



Introduction de la Partie II

La **nomenclature** est l'ossature de toute entreprise manufacturière. La nomenclature décrit de manière non équivoque (Garwood, 1995) la composition de chaque produit fini pour tous les services de l'entreprise (production, bureaux d'études et des méthodes, service commercial, services gestionnaires de l'après-vente). La nomenclature de production définit la liste et la quantité de tous les composants utilisés par un processus de production et/ou d'assemblage pour fabriquer un produit fini donné. Les autres nomenclatures, créées pour répondre à des besoins spécifiques, gravitent autour de cette nomenclature de production.

Le concept de nomenclature est apparu avec le développement de l'artisanat et s'est développé avec les manufactures. Historiquement, une nomenclature se représente par une liste de composants ou par un graphe permettant de visualiser un lien de composition, représenté par un arc, entre deux composants eux-mêmes représentés par des nœuds. Cette dernière représentation est dite arborescente. Elle est encore et toujours utilisée dans la majorité des entreprises de production et est à la base des concepts présents dans la littérature (cf. analyse de la littérature, Chapitre 3, [p75](#)).

Dans des secteurs faisant face à une diversité très importante comme le secteur de l'automobile, la précision de la nomenclature, sa réactivité de mise à jour autant que son architecture efficiente sont des enjeux stratégiques. La gestion des nomenclatures est une activité essentielle dans tous les métiers (Direction R&D ou Commerciale ou des Achats ou de la Logistique, ou de la Production ou Commerciale Après-Vente) et à toutes les phases du cycle de vie du produit. Gérer la nomenclature d'un produit, c'est à la fois la créer, la contrôler (exhaustivité, non dualité, etc.) et la mettre à jour au cours du temps. À titre d'exemple, en phase de développement, la nomenclature doit être organisée pour faciliter la réutilisation de composants ; en phase de commercialisation, elle doit à la fois permettre aux concessionnaires de définir le véhicule commandé par le client et de décrire des prévisions ; en production, elle doit assurer l'appel des bonnes pièces.

Comme nous le verrons, dans les entreprises fabriquant des produits très diversifiés, la nomenclature ne peut plus simplement être structurée de manière individuelle pour chaque produit fini. En automobile, cela aboutirait à une diversité de nomenclatures trop grande pour être gérable lors de toutes les activités d'une entreprise. En effet, pour une seule famille de produits regroupant au global de l'ordre d'une dizaine de millions de produits finis différents à tout instant, il n'est plus envisageable de déterminer une nomenclature par produit.

Aussi, la complexité d'une voiture (cf. Partie I Chapitre 2 §2.2.3) représentée dans une nomenclature arborescente contiendrait un très grand nombre de composants eux-mêmes décomposables ce qui aboutirait à un graphe arborescent à la fois large et profond inexploitable en pratique. Comme nous l'avons illustré précédemment (cf. Partie I Chapitre 2 §2.2), pour une ligne d'assemblage final, un véhicule résulte de la combinaison d'environ 1600 composants alternatifs dont certains, à l'instar du moteur, sont eux-mêmes issus de la composition de plus de 250 composants qui, à leur tour, se décomposent. Un graphe de cette dimension, bien que conceptuellement possible, est difficile à mettre à jour. Il devient alors difficile de gérer en pratique une nomenclature arborescente.

Nous commencerons par une revue de littérature dans laquelle nous analyserons la prise en compte d'une très grande diversité dans la structuration des nomenclatures (chapitre 3). Un certain nombre d'améliorations de la structure classique des nomenclatures ont été proposées par la communauté scientifique mais elles ne répondent cependant pas complètement aux besoins rencontrés par les responsables commerciaux et opérationnels. Quelques constructeurs ont traité ce problème en mettant en place une solution originale, basée sur une description fonctionnelle du produit. Celle-ci permet au client de choisir facilement le véhicule qu'il veut parmi les millions de véhicules possibles, et à ceux qui prennent des décisions opérationnelles (approvisionnements des lignes d'assemblage, ordonnancement...), de retrouver la liste des modules et composants utilisés par le véhicule. Dans le Chapitre 4, nous proposerons une théorisation de cette approche suite à l'étude des pratiques de Renault.

Cette façon de représenter les produits a un impact majeur sur les processus de pilotage de la chaîne logistique. En effet, la construction des Plans Directeurs de Production (PDPs) s'appuie sur des prévisions effectuées par la Direction Commerciale qui a nécessairement une vision du marché exprimée en besoins fonctionnels correspondants aux prestations offertes aux clients. Le passage de ces prévisions à des prévisions portant sur des composants à approvisionner pose de redoutables problèmes méthodologiques. Deux approches sont possibles, sans qu'aucune d'elles ne puisse répondre de manière indiscutable à ces problèmes (chapitre 5).

Chapitre 3. Revue de littérature

Dans la littérature, on observe un consensus sur le fait que, lorsque la diversité de produits finis est trop importante, il n'est plus possible de définir et de stocker les nomenclatures de l'ensemble des produits finis fabricables (Orlicky 1972 ; Mather 1986 ; Erens et Wortmann 1994 ; Olsen et Saetre 1997, etc.). Différentes approches ont alors été développées pour éviter ou limiter la redondance d'informations dans les nomenclatures. La plus connue est sans doute la nomenclature modulaire, nous la détaillerons au §1. Dans les secteurs proposant une très forte diversité de produits à forte valeur, les organisations ont mis en place des processus d'assemblage ou de fabrication à la commande (Erens et Hegge 1994 ; Olsen *et al.* 1997). Ces démarches s'accompagnent mécaniquement par la nécessité pour le client de définir le produit qu'il veut au lieu de choisir parmi une liste de produits proposés. Lorsque le produit est « **simple** », c'est-à-dire lorsqu'il résulte de l'assemblage de peu de sous-systèmes n'ayant entre eux aucune contrainte, le client définit généralement le produit qu'il veut par la liste de ces composants (Erens et Hegge 1994 ; Olsen *et al.* 1997). En revanche, lorsque le produit est « **complexe** », c'est-à-dire lorsqu'il résulte de l'assemblage d'un grand nombre de composants non indépendants, le client décrit le produit qu'il veut par une liste de fonctionnalités, ou de prestations de services généralement à l'aide d'un configurateur. La littérature développe ce concept sous différentes appellations : *parameters* pour Hegge et Wortmann (1991), *features* pour Hegge (1992), *functional features* pour Bertrand *et al.* (2000), *commercial parameters* pour Erens et Wortmann (1996), etc. Ces prestations ont l'avantage d'être explicites d'un point de vue commercial mais nécessitent une interprétation pour que le produit soit fabriqué (Hegge et Wortmann 1991). Dès lors, il est nécessaire de définir une nomenclature permettant de faire le lien entre la définition fonctionnelle du produit (par un ensemble de prestations de services) et la définition organique du produit (par un ensemble de composants). Cette dernière reste nécessaire à des fins de planification et de fabrication (Erens *et al.* 1994 ; Erens et Wortmann 1996). Depuis les années 90, les chercheurs ont développé à cette fin le concept de nomenclature générique que nous détaillerons au §2.

Une très grande variété de produits finis, combinée à d'importantes restrictions pesant sur la libre combinaison des composants alternatifs, pose techniquement deux problèmes : celui de la création – et de l'intérêt – de la liste exhaustive des nomenclatures des produits que l'on peut fabriquer et celui du pointage vers une nomenclature particulière correspondant à la demande d'un client lors de l'expression de sa demande ou lors de sa mise en production. **Nous**

focaliserons notre analyse de la littérature sur les articles traitant de la représentation d'une forte diversité de produits dans les nomenclatures à des fins de définition de produits et/ou de planification et d'ordonnancement. Les articles plus récents traitant de la gamme ou de l'intérêt à fusionner la nomenclature et la gamme n'ont donc pas été retenus ici (Jiao *et al.* 2000 ; Zang *et al.* 2013 ; etc.). Notre analyse fait ressortir une évolution progressive de la structuration des nomenclatures au fil des travaux. Cette structuration, qui a été l'objet de nombreux travaux à la fin du XXe siècle, ne semble aujourd'hui plus remise en cause. Au contraire, notre travail montre justement le besoin d'aller plus loin dans la structuration des nomenclatures pour répondre aux difficultés de la personnalisation de masse. Cette étude de la littérature nous permet de positionner clairement la théorisation de la démarche de certains constructeurs automobiles que nous proposons au Chapitre 4 (p85). À titre de conclusion de la revue de littérature, nous proposerons un tableau de synthèse de la littérature.

1. Nomenclature Modulaire

Une solution au problème posé de représentation d'une famille de produits a été rapidement proposée avec l'introduction de nomenclatures modulaires. La nomenclature de planification est une méthode très connue de planification basée sur la structure de la nomenclature modulaire. Les nomenclatures de planification utilisent des coefficients de prévisions qui sont des ratios prévisionnels qui définissent le mix espéré entre les composants alternatifs de chaque ensemble (Orlicky *et al.* 1972 ; Mather 1986 ; Rusk et Barber 1988 ; Stonebraker 1996). Le principe en est simple : la nomenclature d'un produit fini utilise les références des composants systématiquement montés et des références de composants fictifs correspondant aux ensembles de composants alternatifs utilisés par la ligne de montage. Que ces références soient réelles ou fictives, un coefficient de nomenclature est utilisé ; par exemple, on monte toujours quatre mêmes jantes sur un véhicule, plusieurs jantes différentes étant susceptibles d'être utilisées dans un ensemble de modèles de jantes (ECA) représenté par un composant fictif. Chaque composant fictif pointe à son tour sur les CAs de l'ensemble concerné. Pour définir exactement le produit à assembler, un seul de ces composants alternatifs est sélectionné, opération à réaliser pour tous les ECAs concernés sur la ligne de montage.

L'intérêt des nomenclatures modulaires est double. D'abord, pour la modélisation des familles de produits, elles permettent d'éviter au maximum la redondance d'information (Tallon 1989 ; Hegge et Wortmann 1991). Ensuite, pour la planification, elles permettent de simplifier la définition des approvisionnements au-delà de l'horizon gelé. À titre d'illustration, la [Figure 9](#),

issue de l'article de Hegge et Wortmann (1991), représente la nomenclature modulaire d'une famille de chaises de bureau dont la diversité n'est due qu'à la couleur. Un ensemble de composants alternatifs est défini dans les nomenclatures modulaires par une collection de composants systématiques auxquels doivent s'ajouter un des composants alternatifs. Ci-dessous, la nomenclature d'une chaise représente directement un ECA, elle est le résultat de l'assemblage d'une collection de composants systématiques et de composants dont le choix dépend de la couleur.

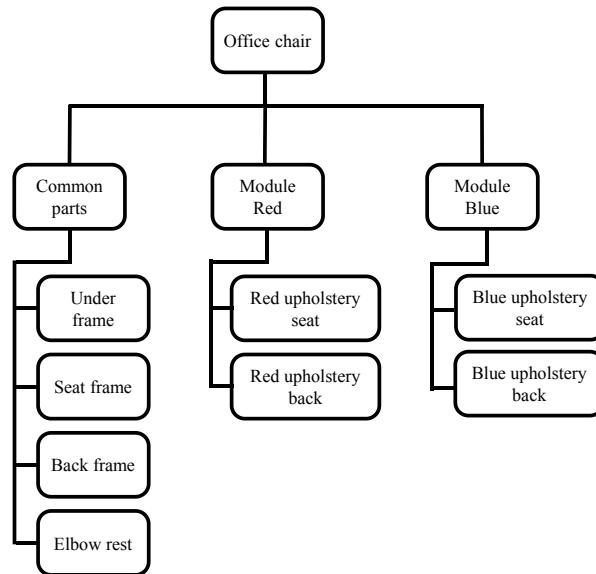


Figure 9 : Exemple de nomenclature modulaire (tiré de Hegge et Wortmann, 1991)

Dans ce contexte, la description d'un produit fini dans une base de données relationnelle (Chrisment *et al.* 2008 ; Date 2012) est relativement simple. Les ECAs correspondent à des types d'entités dont les entités sont des composants alternatifs de ces ensembles. Dans les nomenclatures modulaires, les composants systématiques peuvent être synthétisés par un kit représenté par un seul type d'entité particulier ne possédant qu'une entité. La nomenclature d'un produit fini peut se décrire alors par une association mettant en jeu tous les types d'entités de la famille de véhicules, la clé de cette association concaténant celles des entités retenues. Le pointage d'un produit unique nécessaire pour le passage d'une commande par exemple, passe donc par l'explicitation de toutes les références des composants alternatifs choisis dans chaque ECAs. Cela ne pose pas de gros problèmes tant qu'il existe peu de contraintes à la libre combinaison de composants alternatifs appartenant à des ensembles différents (van Veen et Wortmann 1992, Alblas *et al.* 2012) et que le nombre d'ensembles n'est pas trop grand.

Pour illustrer la complexité de la prise en compte de ces contraintes, nous allons nous appuyer sur la simplification d'un cas réel d'un modèle de véhicule offrant une diversité basée sur quatre

moteurs (M_1, M_2, M_3 et M_4), deux radiateurs (R_1 et R_2), trois alternateurs (A_1, A_2 et A_3), trois climatiseurs (C_1, C_2 et C_3) et trois interfaces de climatisation (I_1, I_2 et I_3). Si l'on fait abstraction des autres ensembles de composants et si l'on suppose une libre combinaison de ces CAs, on obtient $4 \times 2 \times 3 \times 3 \times 3 = 216$ véhicules possibles. La Figure 10, qui se lit du bas vers le haut et qui correspond au graphe des clés des bases de données relationnelles, illustre la prise en compte progressive des contraintes effectivement observées entre CAs : les associations de niveau 1 concernent des contraintes physiques, tandis que celles de niveaux 2 et 3 concernent la prise en compte de contraintes physiques et commerciales ; on peut noter que dans cet exemple, aucune restriction additionnelle n'est introduite au niveau 2. Au niveau 3, les combinaisons autorisées ont été représenté par un 'x'. Les couleurs et les flèches représentent le phénomène de propagation des restrictions de combinaisons pour le composant A_1 . Dans ce contexte, le nombre de produits finis passe de 216 à 10, que l'on peut décrire par les nomenclatures suivantes : $M_1R_1C_1A_1I_1$, $M_2R_1C_1A_1I_1$, $M_3R_1C_1A_2I_1$, $M_2R_1C_2A_1I_1$, $M_2R_2C_2A_2I_2$, $M_3R_1C_2A_2I_2$, $M_3R_2C_2A_3I_2$, $M_3R_1C_3A_3I_2$, $M_3R_2C_3A_3I_3$, $M_4R_2C_3A_3I_3$.

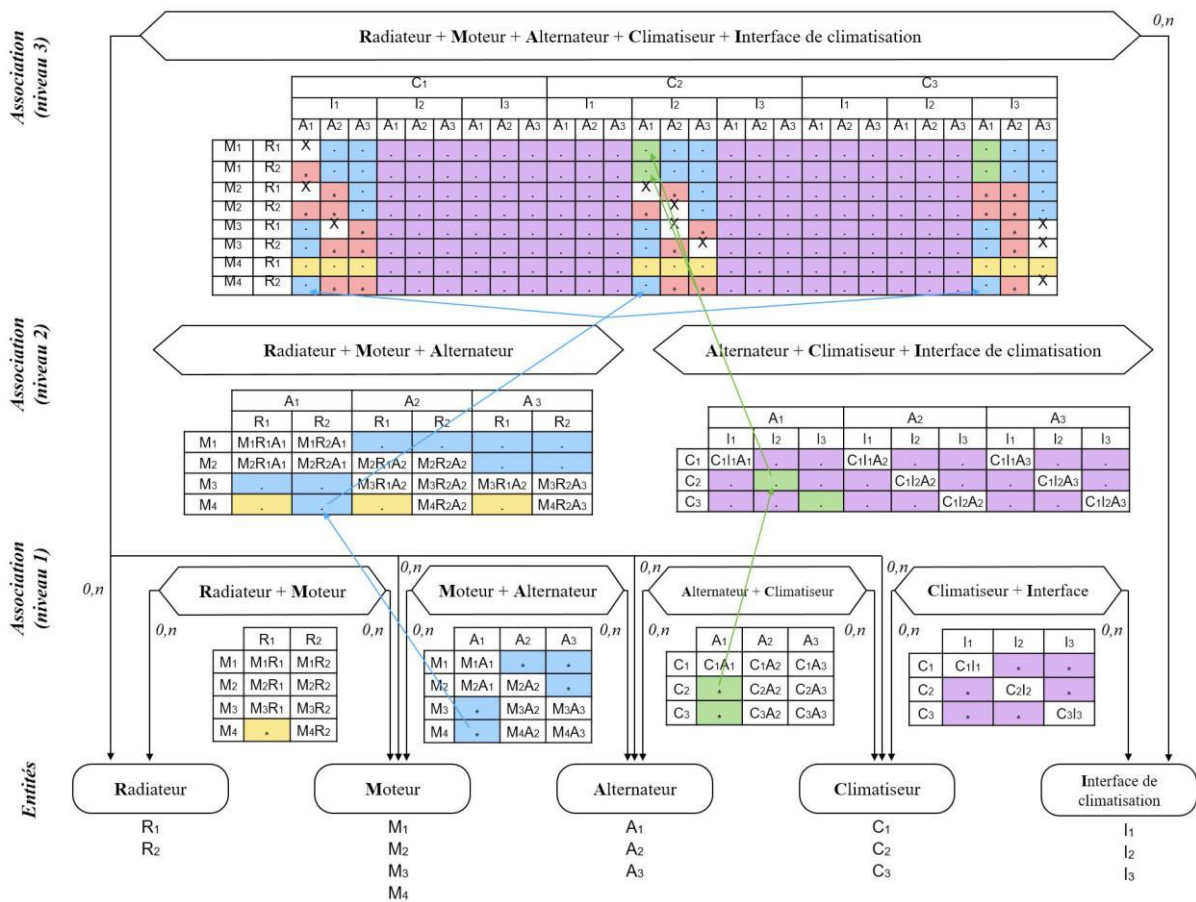


Figure 10 : Exemple de représentation formelle utilisant le modèle des bases de données relationnelles

Cette [Figure 10](#) illustre la nécessité d'utiliser la cinquième forme normale des bases de données relationnelles pour décrire les nomenclatures existantes. En effet, dans cet exemple, seul le niveau 3 permet d'explicitier toutes les combinaisons autorisées. Elle montre également la difficulté d'assurer la prise en compte des contraintes d'intégrité de la base de données, correspondant à ces restrictions entre composants alternatifs dans l'association décrivant la nomenclature d'un produit fini. Cela nous amènera à nous pencher sur la description de ces contraintes. Au vu de ces limites, cette approche est à réserver aux entreprises dont la diversité produite est faible, comme c'est le cas pour les ordinateurs de bureau, cette approche est utilisable sans réelle difficulté.

Ces contraintes à la libre combinaison des composants alternatifs nécessitent alors l'emploi de prédicats définissant les compatibilités entre composants (Romanos, 1989). Un prédicat est une expression logique combinant un ensemble de propositions susceptibles d'être vraies ou fausses, à l'aide des opérateurs OU (noté \vee) et ET (noté \wedge), et dont le résultat final est vrai ou faux. Un prédicat est donc une phrase logique représentant les cas d'emploi d'un composant. Cette logique est connue dans la littérature sous le nom de *Where Use* que l'on peut traduire par nomenclature inverse puisque c'est le composant qui porte l'information des produits finis qu'il peut composer. Cette logique prédictive permet de condenser les contraintes liant l'utilisation d'un composant alternatif (prédicat « vrai ») à la présence, dans le véhicule, de CAs appartenant à d'autres ensembles. Définissons CA_i^{-1} comme étant le prédicat prenant la valeur « vraie » si le composant CA_i peut être monté sur un véhicule, et dont la présence est conditionnée par celle d'autres composants alternatifs CA_j , choisis parmi plusieurs ensembles possibles. On posera aussi $CA_j = vrai$ si le composant CA_j est monté sur le véhicule. On peut alors écrire les trois prédicats suivants correspondant aux trois alternateurs parmi les quinze prédicats possibles (un par composant alternatif) de l'exemple introduit à la [Figure 10](#) :

$$A_1^{-1} = (M_2 \wedge R_1 \wedge ((C_1 \wedge I_1) \vee (C_2 \wedge I_2))) \vee (M_1 \wedge R_1 \wedge C_1 \wedge I_1)$$

$$A_2^{-1} = (M_3 \wedge R_1 \wedge ((C_1 \wedge I_1) \vee (C_2 \wedge I_2))) \vee (M_2 \wedge R_2 \wedge C_2 \wedge I_2)$$

$$A_3^{-1} = (((M_3 \wedge R_1) \vee (M_3 \wedge R_2) \vee (M_4 \wedge R_2)) \wedge (C_3 \wedge I_3)) \vee (M_3 \wedge R_2 \wedge C_2 \wedge I_2)$$

Lorsque la variété résulte de la combinaison de plusieurs centaines d'ensembles de composants alternatifs, conduisant à une variété possible de plusieurs centaines de milliers de produits, cette approche pose non seulement le problème de l'explicitation des nomenclatures décrivant cette

diversité mais aussi celui de son usage dans l'expression de la demande d'un client. Il est, en effet, difficilement imaginable de demander au client de spécifier sa demande en choisissant une combinaison de composants représentatifs de tous les ensembles. La description d'un produit sur la base d'une description organique est d'autant plus difficile à réaliser que certains CAs sont méconnus de la plupart des clients. La nomenclature modulaire n'est donc pas suffisante aujourd'hui pour répondre aux besoins de toutes les directions de l'entreprise (Direction Commerciale notamment) et pour structurer de façon simple la nomenclature. Cela a conduit les chercheurs à améliorer le concept de nomenclature modulaire en paramétrant la nomenclature organique par une vision fonctionnelle.

2. Nomenclature Générique

L'absence de libre combinaison des composants alternatifs des ensembles pose un problème redoutable dans l'explicitation des produits qu'il est possible de fabriquer et de vendre. Une solution à ce problème a été apportée par les nomenclatures génériques. Introduites par Hegge et Wortmann (1991), elles se différencient des nomenclatures modulaires par la définition des composants alternatifs des ensembles à partir de paramètres fonctionnels. Les prédicats ne sont donc plus exprimés à partir des combinaisons logiques de CAs mais par des combinaisons logiques de valeurs de paramètres. La nomenclature générique telle que l'appliquent Erens et Hegge (1994) à un cas pratique, garde donc une structure modulaire mais définit en plus des paramètres dont les valeurs caractérisent de façon non ambiguë les composants alternatifs des ECAs. Cette approche a donné lieu à beaucoup de variantes utiles pour différents métiers (Conception, Comptabilité, Commerce, Logistique, etc.) en fonction du sens donné aux paramètres. La variante qui nous intéresse dans cet article décrit les paramètres comme des **prestations** compréhensibles pour le client (van Veen et Wortmann 1992 ; Bertrand *et al.* 2000). Les intérêts d'une telle description de produits sont clairs :

- elle permet au client de faire son choix au travers de prestations qu'il connaît et voit (van Veen et Wortmann, 1992), cette description a permis le développement des configurateurs web tels que nous les connaissons aujourd'hui ;
- elle permet au client d'exprimer son choix de façon plus condensée que par la liste des références (moins de paramètres que d'ECAs) (Hegge, 1992) ;
- elle permet une meilleure stabilité de la définition de l'offre commerciale, car elle la désynchronise de la variabilité des composants (Olsen et Saetre, 1997) ;

- nous pouvons ajouter qu'elle évite la récursivité dans la définition des prédicats basés sur les CAs. En effet, dans l'exemple de prédicats donnés au §1, les A_i dépendent des C_j mais l'inverse est vrai aussi, ce qui constitue une boucle.

La Figure 11 illustre une telle nomenclature en reprenant l'exemple de la chaise de bureau de la Figure 9. Ici, la nomenclature d'une chaise est représentée comme l'assemblage de trois sous-systèmes dont un est en fait une collection de composants alternatifs. Les deux autres sont des ECAs qui se différencient en termes de fonction (assise et dossier). Dans la nomenclature générique, les paramètres permettent alors de définir dans chaque ensemble le composant alternatif choisi.

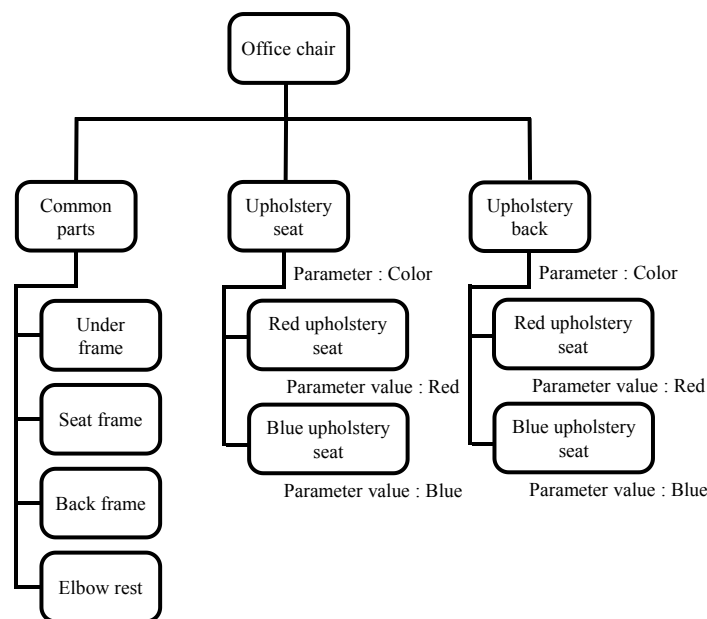


Figure 11 : Exemple de nomenclature générique (adapté à partir de Hegge et Wortmann, 1991)

La nomenclature générique, basée sur une structure hiérarchique arborescente de composants génériques, a encore des limites importantes.

- La structure arborescente contient en elle-même une définition particulière des composants assemblés (i.e. résultant d'un assemblage) qui peut ne pas être adaptée dans le cadre d'une entreprise fabriquant une famille de produits dans plusieurs usines ayant des organisations différentes.
- L'ordre des paramètres fonctionnels/prestations que doit choisir un client définissant le produit qu'il désire, est forcé par la structure hiérarchique arborescente de la nomenclature organique supportant de la nomenclature générique.

- L'usage d'une liste de paramètres fonctionnels/prestations pour définir un produit fini particulier s'appuie encore sur une nomenclature organique. C'est notamment le cas puisque les contraintes de combinaisons sont exprimées au niveau organique entre les composants. Cette dépendance conduirait à une complexité opérationnelle dans la gestion de l'offre commerciale et donc à l'augmentation d'un risque d'erreur lors des évolutions dans le temps de la diversité à décrire.

Les nomenclatures génériques sont donc vues comme des nomenclatures arborescentes de composants génériques qu'Erens et Wortmann (1996) appellent des *familles de composants* ou que Bertrand *et al.* (2000) appellent *pseudo-item*. Un composant générique est donc un ECA. Chaque composant générique est composé d'un composant systématique et de composants génériques. L'arborescence de composants génériques s'arrêtant à un *composant feuille* qui est acheté ou produit. Le niveau $n+1$ (décomposant le niveau supérieur assemblé n) est caractérisé à la fois par toutes les valeurs des paramètres hérités du niveau n et d'un certain nombre de paramètres supplémentaires. Le choix d'un composant peut donc être déterminé *in fine* par les valeurs de plusieurs paramètres.

En 1996, Erens et Wortmann proposent une théorie basée sur la structuration des informations dans une entreprise en dissociant trois types de descriptions d'une famille de produits : la vue fonctionnelle, la vue technologique et la vue physique. Les trois vues sont structurées de façon arborescente et bien que très liées elles peuvent être utilisées indépendamment les unes des autres, en fonction du besoin. Cette décomposition est intéressante car elle permet de dissocier les trois descriptions de produits souvent faites et utilisées par des équipes différentes, notamment en phase de développement. Cette démarche utilise le concept de nomenclature générique et de paramètres mais les auteurs exploitent la vision fonctionnelle dans une démarche de conception et non de configuration commerciale.

Olsen and Saetre (1997) complètent cette approche en introduisant une description des contraintes entre paramètres liant des CAs différents. Ces contraintes exprimées sous forme logique (de type « si ... alors »...) ne sont pas portées par la nomenclature générique mais l'accompagnent dans le système d'information. Les auteurs, sans expliquer comment, disent alors que les applications commerciales (configurateur web, outil de passage de commande, outil de prévisions, etc.) doivent assurer en temps réel lors de la configuration le respect de ces contraintes. Ils sont les premiers à parler explicitement de produit virtuel qu'ils définissent comme la concaténation des choix de valeurs de chacun des paramètres utilisés dans la définition de la nomenclature générique du produit. Sans en exploiter complètement toutes les

possibilités, ces auteurs proposent implicitement une quatrième vision - une vue commerciale du produit - à la structure proposée par Erens and Wortmann (1996). Nous cherchons clairement à poursuivre cette démarche.

Le **Tableau 7** ci-dessous, synthétise ce chapitre d'analyse de la littérature en faisant ressortir les articles majeurs que nous avons cités précédemment. Cette grille d'analyse permet de faire ressortir entre autre l'évolution progressive des structures des nomenclatures. Dans les années 80, la nomenclature est modulaire et purement organique ; dans les années 90, la nomenclature devient générique et donne progressivement le sens de prestations commerciales aux paramètres qui conditionnent le choix des composants alternatifs dans les ECAs. Notre proposition mise en dernière ligne de ce tableau, permet de voir que la théorisation que nous proposons au chapitre suivant s'inscrit dans la continuité en utilisant à la fois une structure générique mais en allant plus loin dans la séparation des descriptions de la diversité en fonction des points de vue.

Tableau 7: Synthèse de l'analyse de la littérature

auteurs	date	type d'article	problématique majeure	diversité de produits	diversité d'ECAs	niveaux de nomenclature des CAs paramétrés	type de nomenclature	explicitation de contraintes	dissociation des points de vue
Orlicky et al.	1972	théorique	planification	importante	faible	1	modulaire	non	non
Mather	1986	théorique	planification	importante	faible	1	modulaire	non	non
Rusk et Barber	1988	théorique	identification*, estimation des coûts	importante	faible	1	modulaire	non	non
Tallon	1989	théorique	planification	importante	moyenne	1	modulaire	non	non
Hegge et Wortmann	1991	théorique	modélisation de familles	importante	moyenne	n	générique	non	non
Hegge	1992	théorique	identification*	importante	moyenne	n	générique	non	non
van Veen et Wortmann	1992	théorique	identification*	importante	moyenne	n	générique	non	non
Erens et al.	1994	théorique	modélisation de familles	importante	moyenne	n	générique	non	non
Erens et Hegge	1994	cas d'étude	identification*	importante	moyenne	n	générique	non	non
Erens et Wortmann	1996	théorique	modélisation de familles	importante	moyenne	n	générique	oui	oui
Stonebraker	1996	théorique	planification	importante	moyenne	n	générique (implicite)	non	non
Olsen et Saetre	1997	théorique	modélisation de familles	importante	moyenne	n	générique	oui	oui (implicite)
Bertrand et al.	2000	théorique	planification	importante	forte	n	générique	non	non
notre proposition	2015	cas d'étude	identification* et planification	importante	forte	1	générique	oui	oui

* identification d'un produit fini unique dans la famille

Ce tableau fait aussi ressortir qu'à notre connaissance, il y a eu un « creux » dans la recherche de solution de représentation de la diversité. Ce creux s'explique selon nous par deux raisons. Le premier est d'abord dû à notre filtre de sélection d'articles puisque nous avons exclu les textes visant au rapprochement de la nomenclature et de la gamme de fabrication alors même que c'est le courant majeur depuis les années 2000 dans ce domaine. Le second aspect qui peut expliquer ce manque de travaux récents est une acceptation implicite par la communauté scientifique que la nomenclature générique permet de répondre à toutes les attentes en termes de représentation de la diversité. Un des apports de cette thèse, au contact du terrain industriel, est bien de montrer que la nomenclature générique est loin d'être satisfaisante dans le cadre de la personnalisation de masse de produits complexes (c'est-à-dire composés d'un grand nombre de composants interdépendants).

Chapitre 4. Les Nomenclatures chez Renault : la Documentation

L'analyse de la littérature montre l'intérêt de l'usage d'une nomenclature générique à la fois pour décrire la nomenclature d'une famille de produits et pour pointer sur un produit particulier. Dans ce chapitre, nous décrirons et analyserons un cas d'application réel issu de l'industrie automobile. Nous verrons que ce cas d'étude présente des similitudes et des écarts par rapport à la littérature, **notre apport est de les théoriser**.

Dans le vocabulaire du groupe Renault, la **Documentation** désigne pour l'essentiel la définition des produits. Nous pouvons la définir de façon conceptuelle comme l'ensemble des données permettant de décrire à la fois :

- l'ensemble des produits offerts par l'entreprise,
- l'ensemble des composants nécessaires à la fabrication de ces produits,
- les liens de composition rattachant les composants au(x) produit(s) qui les utilisent.

La Documentation utilisée par les constructeurs automobiles se différencie dans le concept même de la nomenclature telle que décrit au chapitre précédent. Elle dissocie la description d'un produit, la description d'un composant et la description des liens entre les deux. La Documentation permet donc de décrire de manière **non ambiguë** un produit sans faire appel à la liste de ses composants. Nous reverrons que cela est devenu nécessaire pour la Direction Commerciale en contact avec le client (§1.1).

Les constructeurs automobiles structurent leur Documentation autour de deux visions de la diversité. Comme nous le verrons en détail dans ce chapitre, l'une est principalement faite pour le client : la **Documentation Commerciale** (§3) tandis que l'autre est tournée vers les besoins de la conception et de la fabrication : la **Documentation Technique** (§1.2.2). Avant de voir en détail ces Documentations, nous évoquerons dans le §1 les raisons de cette double définition et le macro-processus permettant leur synchronisation.

Chez Renault, la documentation est découpée par famille de produits pour en limiter la taille et pour en simplifier la gestion lors du développement de chaque nouvelle famille de produits. Ce découpage sera supposé déterminé dans la suite de cette partie et nous évoquerons, sauf mention explicite contraire, seulement la documentation d'une seule famille. Ce découpage n'est pourtant pas sans conséquence opérationnelle mais nous y reviendrons dans la troisième partie de cette thèse Chapitre 7 §3.1.

1. Macrostructure de la Documentation Renault

1.1. De la nécessité d'utiliser deux langages

L'automobile ne permet plus aux clients, au travers des informations commerciales dont ils disposent, de choisir et même d'avoir conscience de chaque composant nécessaire à la fabrication d'un véhicule. Un client ne peut donc pas personnaliser un produit qu'il envisage d'acheter en choisissant directement un CA dans chaque ensemble de composants alternatifs nécessaire. C'est notamment le cas pour un certain nombre de composants répondant à des fonctions invisibles du client comme les faisceaux électriques et les alternateurs. Un client achetant un véhicule s'exprime en fait au travers d'un configurateur internet ou d'un agent commercial (qui utilise le configurateur pour lui). Il exprime le véhicule désiré par le choix de plusieurs niveaux de services pour des fonctionnalités, c'est-à-dire par le choix de plusieurs **Prestations Alternatives** (PAs) prises dans différents **Ensemble de Prestations Alternatives** (EPAs). Ce langage est **non ambigu et explicite** d'un point de vue du client, c'est-à-dire qu'il permet dans un langage compréhensible pour un client de définir précisément un véhicule unique (au sens juridique du bien fongible déjà évoqué en Partie I Chapitre 2 §1.1).

La diversité offerte à un client en termes de prestations alternatives n'est qu'un sous-ensemble de la diversité offerte par une entreprise. En effet, un client passant commande le fait dans un cadre spatio-temporel précis (un pays et une date). Comme nous l'avons vu dans la Partie I Chapitre 2 §2.1, ce cadre spatio-temporel agit comme un filtre qui réduit la diversité de produits finis offerte à ce client par une entreprise. Pour la Direction Commerciale, la définition non ambiguë d'un produit fini unique nécessite donc d'ajouter à la liste des PAs choisies par un client, un certain nombre d'informations décrivant le cadre spatio-temporel précis. De manière pratique, ce cadre est aussi modélisé par un certain nombre d'EPAs supplémentaires, **invisibles** des clients.

D'un point de vue technique, la Direction de la R&D ou de la Fabrication a nécessairement besoin d'explicitier la diversité de composants à concevoir et à approvisionner pour fabriquer la diversité de produits finis commercialisés. Cette description **organique** s'oppose à la description conceptuelle et **virtuelle** utilisée par la Direction Commerciale. La définition d'une description commune à tous les métiers de l'entreprise s'avère alors impossible pour les entreprises ayant des produits à forte diversité et à nombreux niveaux de nomenclature.

Renault, comme l'ensemble de ses partenaires (Nissan, GM, Daimler, Fiat, etc.), a alors structuré sa définition de produits autour de deux visions principales : l'une orientée client, la **Documentation Commerciale** (DocC) et l'autre, tournée vers les besoins des Départements de la R&D et de la fabrication, la **Documentation Technique** (DocT). Exactement comme le découpage de la diversité présenté en Partie I Chapitre 2 §1.2, la Documentation Technique est subdivisée en une DocT de conception et une DocT de production. Dans le paragraphe suivant, nous évoquerons rapidement les avantages et les enjeux liés à la définition de deux langages dans la gestion de la Documentation. Dans le §1.2.2, nous décrirons alors plus en détail la DocT puis dans le §3, la DocC.

1.2. Synchronisation des deux langages

Pour chaque famille de produits, la définition de deux Documentations pose la question de la synchronisation. Cette synchronisation est nécessaire à deux étapes majeures du cycle de vie d'une famille de produits. La première étape est en phase de conception, lors de la définition d'une diversité commerciale souhaitée et de sa traduction en une diversité fonctionnelle puis technologique et enfin technique organique. La seconde est en phase de production, lors de la « traduction » d'une demande commerciale en produits finis (issue de commandes de clients ou de prévisions). Tout au long du cycle de vie de la famille de produits, la synchronisation de la DocC et de la DocT est permise par des échanges réguliers entre les départements en charge de la conception du produit et ceux en charge de la définition de l'offre commerciale. Il est nécessaire de permettre la synchronisation de ces deux langages afin d'assurer la définition d'un même ensemble de produits finis.

D'un point de vue global, l'usage de deux descriptions des produits a l'avantage de permettre une désynchronisation entre la dynamique de la diversité commerciale et la dynamique des diversités techniques. En effet, comme nous l'avons évoqué précédemment (Partie I Chapitre 2 §2.2), l'offre produits est en constante évolution pour tenir compte de la concurrence, du vieillissement de la gamme ou pour des actions commerciales. Grâce à la désynchronisation des deux Documentations, toutes ces évolutions commerciales n'ont pas d'impact sur la description technique des produits. La DocT est extrêmement dynamique aussi. La plupart de ces changements sont en général invisibles du client ; la désynchronisation des deux visions des produits permet donc ici aussi de limiter la charge de mise à jour de la Documentation.

1.2.1. Macro-processus de synchronisation des deux Documentations lors de la conception d'une famille de produits

Comme nous l'avons dit en introduction de ce chapitre, la Documentation est découpée par famille de produits. Ce découpage colle rigoureusement à la structure organisationnelle des entreprises qui se sont structurées par projet depuis plusieurs dizaines d'années. Nous pouvons définir un projet comme l'ensemble des actions permettant la gestion d'une famille de produits tout au long du cycle de vie (Midler, 1993). La définition et la mise à jour de la Documentation sont des activités majeures des projets. Schématiquement, un projet se découpe en quatre grandes phases. Ces quatre phases se succèdent dans le temps et font intervenir tout ou partie des Directions de l'entreprise. Les trois premières phases constituent le développement d'une famille de produits (elles durent en moyenne trois ans) tandis que la dernière correspond à la phase de production et de commercialisation de la famille. Elles se subdivisent elles-mêmes en activités jalonnées par des instances de décisions validant l'avancement et permettant un arbitrage le cas échéant. Détaillons succinctement ces quatre phases et les activités de Documentation qu'elles comportent :

- La phase de Cadrage permet aux équipes marketing, R&D et commerciale sous la direction d'un chef de projet, de définir les caractéristiques majeures de la famille à créer. Le but n'est pas ici de décrire l'ensemble des fonctions du produit mais des paramètres dimensionnant comme la clientèle visée, les marchés visés, le positionnement de la famille face à la concurrence dans les segments marketing, et en termes de prix de vente. En fin de cadrage, une première définition de la diversité est donnée. Cette définition est nécessairement élaborée à ce stade dans le langage commercial. La DocC est donc initialisée en premier lieu. L'initialisation de la DocC nécessite d'abord la création d'un glossaire regroupant l'ensemble des codifications des ensembles et des prestations alternatives qui permettront de décrire la diversité de la famille. Ensuite, une première description globale de la diversité commerciale de produits est élaborée par la définition de tableaux de combinaisons de prestations alternatives appartenant à des ensembles différents (étape 1 de la [Figure 12](#)). Cette diversité décrite est dite **globale** car elle ne fait pas apparaître les restrictions de combinaisons liées à un cadre spatio-temporel. La diversité décrite ici est donc théorique et maximale car elle est restreinte uniquement par des contraintes techniques majeures entre les fonctionnalités et des contraintes commerciales macroscopiques qui s'appliqueront à tous les marchés et durant toute la durée de commercialisation de la

famille. Chaque tableau ne regroupe pas l'ensemble des EPAs⁸. Chaque tableau peut alors être interprété comme une projection à k dimensions (nombre d'EPAs choisis dans le tableau) de l'espace à n dimensions (nombre d'EPAs du dictionnaire de la famille) représentant la diversité globale.

- La phase de Conception permet aux équipes marketing et R&D de définir l'ensemble des fonctionnalités que la famille de produits proposera. Cette définition se faisant à coût objectif, la R&D est en contact permanent avec les Directions des Achats, de la Logistique et de Fabrication pour évaluer les différents scénarii techniques élaborés. La précision croissante des solutions techniques au fur et à mesure de cette phase conduit à mettre à jour progressivement les contraintes techniques de combinaisons définissant la diversité globale. Cette phase permet aussi d'initialiser la DocT (étape 2 de la [Figure 13](#)). Nous verrons en détail au paragraphe suivant les éléments qui constituent cette partie de la Documentation. Pour la Direction de la R&D, seule utilisatrice à ce stade de la DocT, les éléments structurants sont les fonctions techniques et les ensembles de composants alternatifs. Là aussi, l'initialisation de la DocT nécessite la définition d'un glossaire pour la famille regroupant l'ensemble des codifications des fonctions et des ECAs utilisés (étape 1 de la [Figure 13](#)). La DocT décrit de façon technique l'ensemble des fonctions techniques à réaliser pour couvrir la diversité globale et à préciser en cascade les solutions technologiques puis techniques et *in fine*, les composants alternatifs répondant à ces fonctions (étape 3 de la [Figure 13](#)).
- La phase d'Industrialisation permet aux Directions des Achats, de la Logistique et de la Fabrication de définir les fournisseurs, les flux et les moyens de production de l'ensemble des composants nécessaires à l'approvisionnement et au montage dans la ou les usine(s) d'assemblage final de cette famille de produits. Là aussi, la détermination précise de ces informations pour chaque composant alternatif peut conduire à une modification des choix opérés lors de la phase précédente, ce qui implique des mises à jour de la DocT. Lors de cette phase, la DocT, initialisée par la Direction R&D, est envoyée dans chaque usine en charge de la production de la famille de produits qui, en fonction de leurs processus de production particuliers, définit les liens de composition entre les composants (étape 4 de la [Figure 13](#)). À ce stade, la DocT uniquement écrite sur un seul niveau par la Direction de la R&D est enrichie par une information de

⁸ Ce choix de définition de la diversité globale semble partagé avec certains constructeurs automobiles européens (PSA, Daimler, etc.) mais n'est pas actuellement la méthode employée par Nissan.

composition très utile en planification. La diversité de composants est à partir de ce moment-là localisée en fonction du site de production. En parallèle, la Direction Marketing construit à partir de la diversité Globale la **diversité Enveloppe** (étape 2 de la [Figure 12](#)). Cette diversité est décrite dans la DocC. C'est une réduction de la première qui tient compte à la fois d'un ciblage plus fin des clients potentiels, d'une stratégie de montée en gamme pour la famille et de l'offre des autres familles déjà commercialisées ou en développement par la marque⁹. Ensuite dans chaque région commerciale où la famille de produits sera vendue, l'équipe marketing *locale* a pour mission, à partir de la diversité Enveloppe, de définir la diversité **Locale** (étape 3 de la [Figure 12](#)). Cette diversité, toujours exprimée dans la DocC, est un sous-ensemble de la diversité Enveloppe permettant de réduire le choix à ce qui est pertinent pour les attentes particulières des clients de la région pour les premiers mois de commercialisation de la famille. Pour chaque région, en fonction de la stratégie marketing locale et en accord avec la Direction de la Fabrication et la Logistique, la diversité Locale est finalement datée, on définit une date de début et une date de fin de la diversité offerte (étape 4 de la [Figure 12](#)). Ces deux dernières étapes permettent de définir avec rigueur le cadre spatio-temporel nécessaire à la Documentation et à la nomenclature. En fin de phase d'industrialisation, la documentation doit permettre la production des véhicules de présérie avec le processus standard de commande et de production.

⁹ La notion de marque ne doit pas être confondue avec la notion d'entreprise. Par exemple, le Groupe Renault regroupe trois marques (Renault, Renault Samsung Motors et Dacia) et le Groupe Volkswagen regroupe douze marques dont huit dans le secteur automobile (Seat, Skoda, Volkswagen, Porsche, Audi, Bentley, Bugatti et Lamborghini). Jusqu'à aujourd'hui, pour maintenir une image de marque propre, il existe généralement autant de Directions marketing que de marques dans les Groupes automobiles.

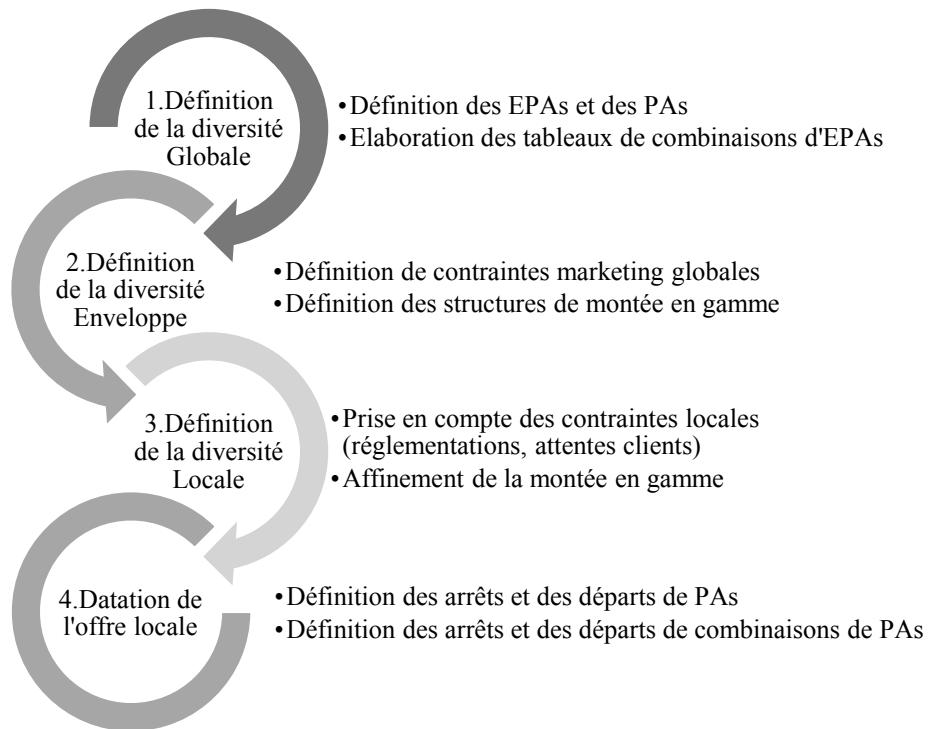


Figure 12 : Représentation macroscopique du processus de définition de la Documentation Commerciale

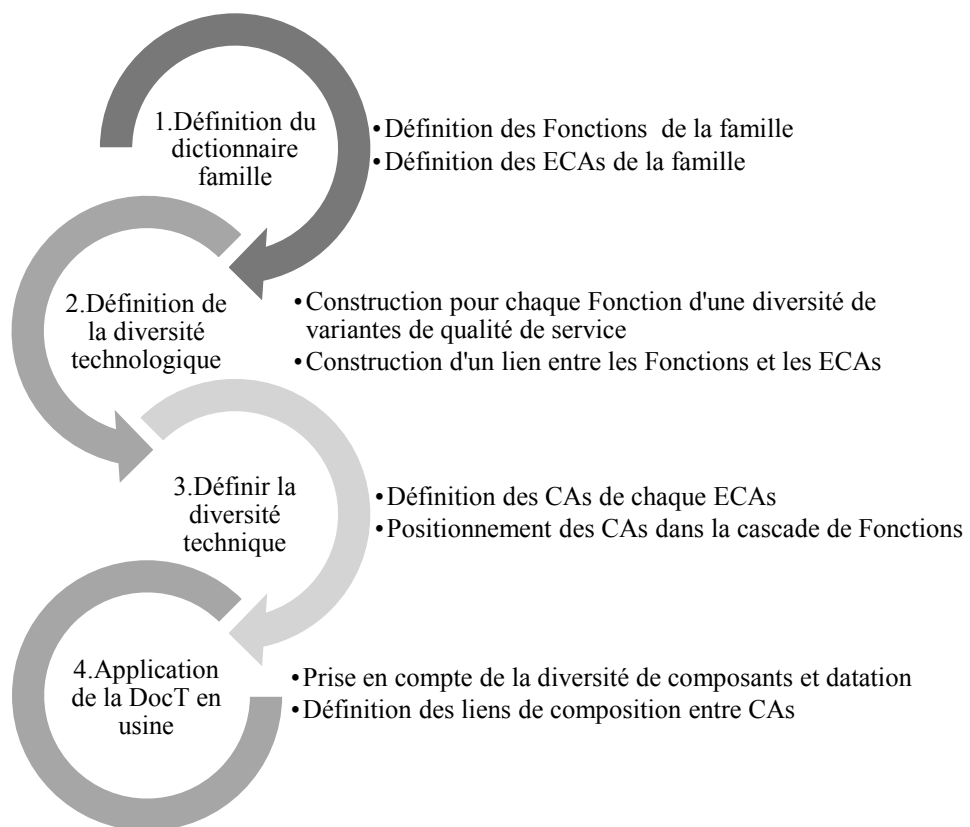


Figure 13 : Représentation macroscopique du processus de définition de la Documentation Technique

- La phase de Production débute par une montée en cadence des usines de carrosserie montage pendant laquelle un grand nombre de modifications de composants sont opérées par la Direction de la R&D ; cela nécessite des mises à jour importantes de la DocT. En régime permanent, les modifications restent nombreuses mais elles sont dues à la dynamique à la fois des diversités commerciales locales (création de versions limitées, changement de l'offre, etc.) et des diversités techniques locales de composants gérées par les usines. Dans cette phase assez longue (six ans en moyenne), la famille fera l'objet de mises à jour globales de son offre qui prendront la forme de mini-projets. Ces changements de génération sont l'occasion de réactualiser le design et les fonctionnalités de la famille pour relancer les ventes. Il y a en moyenne deux changements de génération dans toute la durée de vie commerciale d'une famille. Ces changements de génération occasionnent une modification d'environ 30% des composants et un changement important de toute la Documentation. Du côté de la DocC, il y a de nouveau une définition des nouveaux EPAs et PAs, d'une diversité globale et en cascade d'une diversité enveloppe puis commerciale locale. Du côté de la DocT, les changements de fonctionnalités conduisent à des changements dans les Fonctions et en cascade dans les ECAs et les CAs puis, dans les liens de compositions entre CAs propres à chaque usine.

Le schéma ci-dessous reprend de façon globale les niveaux de description de la diversité qui structurent la Documentation. Il fait apparaître la DocC et la DocT ainsi que la synchronisation entre les diversités de produits et de composants lors de la création de la Documentation. La synchronisation lors de l'usage sera présentée plus en détail dans le §3.2.

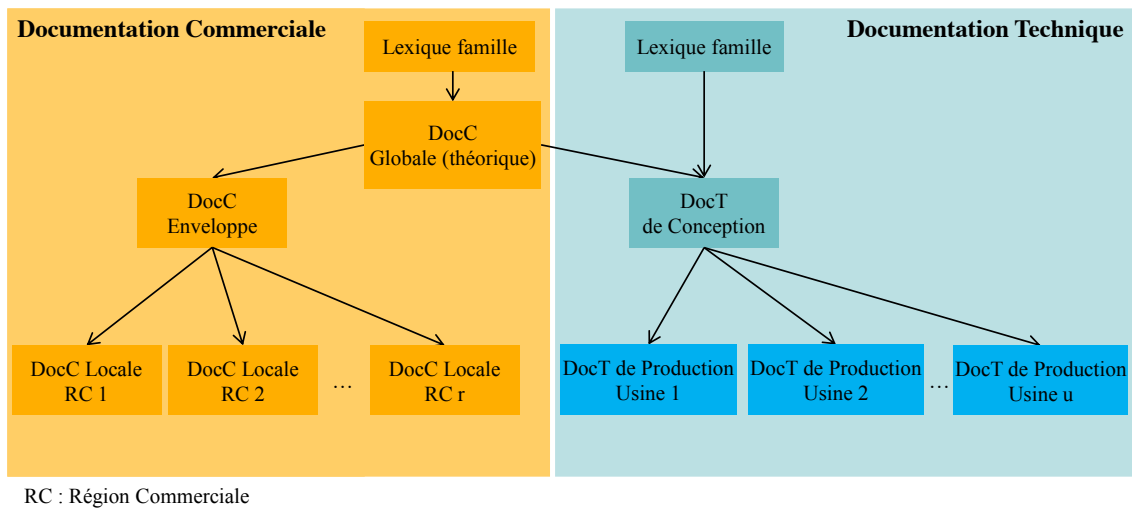


Figure 14 : Schéma global de structuration de la Documentation

1.2.2. Macro-Processus de traduction de la Documentation Commerciale en Documentation Technique en phase de production

Pendant la période de commercialisation d'une famille de produits, la synchronisation de la Documentation Commerciale et de la Documentation Technique de production de cette famille est une étape indispensable à la planification de la production. La Direction Commerciale comme le client définit un produit fini par le biais de prestations alternatives (cf. §1.1) alors que la gestion de production notamment la planification des approvisionnements, ne peut se faire qu'à la maille des composants alternatifs. De façon quotidienne, il est donc nécessaire de pouvoir traduire la diversité de produits finis à fabriquer exprimée au travers de la Documentation Commerciale en une diversité de composants à acheter ou à produire exprimée au travers de la Documentation Technique de production.

Sans entrer ici dans le détail des mécanismes permettant cette traduction que nous développerons au §3.2, il est intéressant d'étudier quelle documentation est utilisée dans chaque activité macroscopique du processus de planification industrielle. La planification industrielle regroupe les activités tactiques de définition des Plans Industriels et Commerciaux (PIC ou *S&OP* en anglais) et des Plans Directeurs de Production (PDP ou MPS en anglais), les activités opérationnelles de Calculs des Besoins Nets à approvisionner (CBN ou MRP en anglais) et d'ordonnancement de la production. Dans le secteur automobile, ces activités sont complexes, nous les évoquons brièvement ici sans entrer dans le détail. Les lecteurs intéressés par le sujet peuvent par exemple lire les travaux de Sali (2012) pour avoir une description complète de certains de ces mécanismes chez Renault. Nous pouvons tout de même indiquer que :

- Le PIC représente sur un horizon lointain (environ 2 ans à la maille du mois ou de la semaine) mais avec un niveau de détail faible, les volumes prévisionnels de production. Ce volume est le résultat d'un accord entre la demande commerciale et la capacité de l'usine. Le PIC est donc défini dans le langage de la Documentation Commerciale.
- Le PDP affine le PIC sur une partie restreinte et plus proche de l'horizon en affinant le niveau de détail (environ 9 mois à la maille de la semaine ou du jour). La pratique actuelle de Renault consiste à définir les PDPs au niveau 0 de la nomenclature, il existe théoriquement autant de PDPs que de produits finis. Dans le Chapitre 5 (p111), nous développerons les différentes pratiques possibles pour définir les PDPs dont celle de Renault. Le PDP doit tenir compte à la fois des commandes fermes de clients et des prévisions commerciales. En automobile, compte tenu de la diversité de produits finis fabricables et de la variabilité des volumes de production, on définit plutôt un « carnet de production » qui liste directement les produits finis – c'est-à-dire les véhicules – à produire sur une ligne d'assemblage donnée par période de temps. La maille temporelle définissant une période dépend de son éloignement par rapport à la date du jour ; approximativement, nous pouvons dire que les deux prochaines semaines dans l'horizon sont définies à la maille de la journée tandis que le reste de l'horizon est à la semaine. Le PDP au niveau 0 de la nomenclature est donc défini dans le langage de la Documentation Commerciale puisque la DocC de Renault, comme nous le verrons, permet de définir complètement et sans ambiguïté un véhicule précis.
- Le Calcul des Besoins Nets permettant de définir les demandes d'approvisionnements des composants se base sur la méthode MRP (Materials Ressources Planning). Pour cela, les demandes en produits finis représentées par des PDPs au niveau 0 doivent être éclatées en demandes en Composants de niveau 1. Ces besoins nets de niveau 1 seront eux-mêmes éclatés de manière itérative. Ce mécanisme classique de MRP est classiquement appelé *explosion* de la nomenclature. C'est précisément à cette étape que la traduction de la Documentation Commerciale en une Documentation Technique est nécessaire. En effet, à cette étape et seulement à cette étape, il est nécessaire de faire le lien entre un véhicule défini par une liste de prestations alternatives et sa composition organique définie par une liste de composants à assembler. Nous détaillerons dans le §3.2 la mécanique de traduction de chaque véhicule (niveau 0 de la nomenclature) définie dans la DocC en une liste coefficientée de pièces de niveau 1 dans la nomenclature. L'éclatement d'un ensemble de véhicules d'une période donnée permet de déterminer les volumes de chaque composant de niveau 1 pour cette période. Il est

alors nécessaire de poursuivre le mécanisme classique d'explosion des nomenclatures organiques pour définir par itérations successives les besoins nets des composants de tous les niveaux de composition de la DocT de production.

La figure suivante synthétise cette articulation en cherchant à montrer quelle Documentation est utilisée à quelle étape du processus de planification industrielle et à quel niveau de détail (maille).

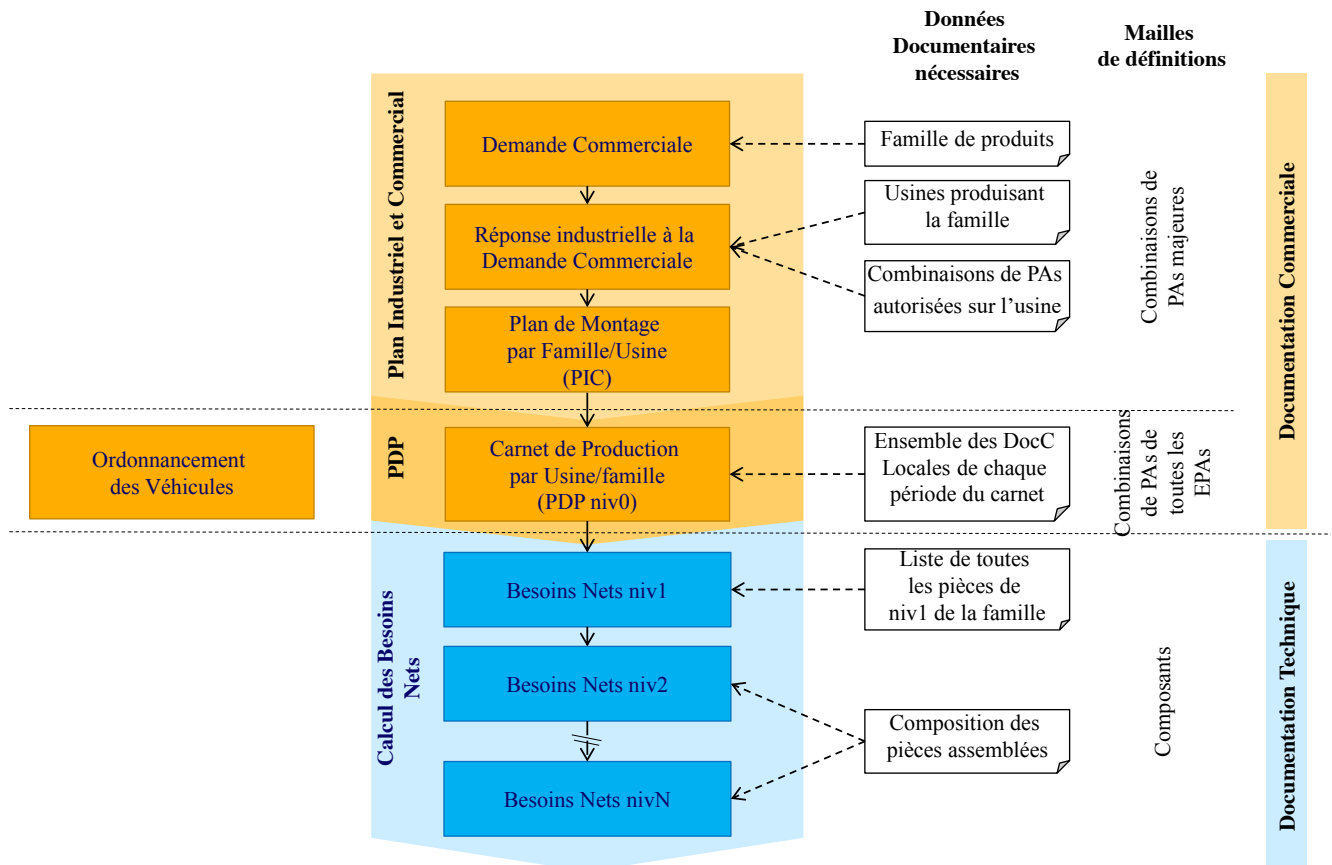


Figure 15 : Schéma global des processus de planification et usage de la Documentation chez Renault

2. Documentation Technique

La Documentation Technique est le support de la définition de la diversité de composants nécessaire à la fabrication des produits d'une famille. La Documentation Technique est donc une vision organique de la diversité qui est nécessaire mais non suffisante à elle-seule pour produire un véhicule. En effet, la DocT permet de définir les composants, elle doit être associée à une DocC pour définir la composition d'un produit fini particulier. La vision organique que la DocT propose reste indispensable lors des phases de conception et de production de chaque famille.

Dans le §2.1, nous évoquerons les raisons qui poussent à découper la DocT en deux parties : d'un côté, la DocT utilisée en conception et d'un autre, la DocT utilisée en production. Nous développerons ensuite le contenu de ces deux parties de la DocT dans deux paragraphes distincts (§2.2 et §2.3).

2.1. De la nécessité d'un découpage de la Documentation Technique

En phase de conception, la transformation de fonctionnalités du produit en composants se fait selon une analyse fonctionnelle. Sans entrer dans le détail des méthodes ici, l'analyse fonctionnelle conduit à spécifier les fonctionnalités explicites pour un client en fonctions techniques quantifiables puis, à spécifier une architecture technologique pour couvrir ces fonctions et enfin, à définir un cahier des charges des composants (ce processus est classique). Pour la conception, la DocT permet donc de faire un lien entre la décomposition en fonction des attentes clients et les composants qui les réalisent.

En phase de production, la DocT doit permettre de connaître la liste des composants permettant de fabriquer l'ensemble des produits d'une famille dans une usine d'assemblage donnée. Elle doit plus encore permettre de déterminer sans ambiguïté la liste des composants nécessaires à la fabrication de chaque produit particulier de cette famille. En phase de production, cette liste de composants est nécessaire pour différentes activités : en planification, elle permet de gérer les approvisionnements, en interne, elle permet de gérer les flux d'approvisionnement des chaînes de production. C'est aussi le support clé de la définition des *gammes* de fabrication en donnant les liens d'assemblage entre composants.

En conception, la définition fonctionnelle laissée à la discrétion des ingénieurs de la Direction R&D est très précise, ce qui génère un très grand nombre de fonctions. Par exemple, la fonction *autonomie* d'un véhicule thermique se traduit sur un plan technique par les composants *réservoir, pompes, jauge, bouchon, col d'alimentation, tuyau d'alimentation* et *support de réservoir*. Parce que cette fonction est importante notamment en termes de sécurité, la Direction de la R&D de Renault définit un cahier des charges pour chacun de ces composants produits par un fournisseur. En revanche, pour des raisons de production, les usines approvisionnent un composant résultant de l'assemblage de certains de ces composants (les cinq premiers). Dans cet exemple, les usines géreront donc trois composants différents alors que la Direction de la R&D en gèrera sept. Parfois, le niveau de détail nécessaire en usine impose une diversité importante en conception. Par exemple, la structure de la porte est une fonction qui pourrait être un seul composant de la DocT utilisée par la Direction de la R&D. En production, c'est le

résultat d'un assemblage de différentes pièces de tôlerie qui sont généralement produites dans les sites fabriquant la famille. La production de ces pièces fait appel à des presses et des outillages dont les temps de préparation imposent une organisation par lot qui incite à une production pour stock. L'organisation de la production nécessite alors l'identification de ces composants intermédiaires dans la DocT de production. Le besoin de définir ces composants dans la DocT de production impose de les définir en amont dans la DocT de conception. Ces deux exemples illustrent le fait qu'en fonction du métier, la maille pertinente de définition des systèmes et des sous-systèmes peut varier. L'existence de besoins différents conduit à scinder la DocT en deux parties : une de conception et l'autre de production. Nous le développerons surtout dans le §2.3, la DocT de production est nécessairement issue de la DocT de conception.

L'organisation de la production peut également avoir un impact à prendre en compte dans la définition de la DocT de production. Par exemple, une première usine peut monter un CA composé d'un moteur couplé à sa boîte de vitesses, tandis qu'une autre usine reçoit un moteur sur un premier poste de la ligne, qu'il couple ensuite à une boîte de vitesses sur un poste suivant de la ligne. Cela conduit à avoir potentiellement des écarts de besoins de définition de la diversité en DocT d'une famille entre deux sites. Dans ce cas, il faut envisager de lier les nomenclatures aux sites industriels de production. Cela justifie aussi le découpage de la DocT pour minimiser la redondance d'information dans la DocT. En effet, le découpage permet d'avoir une DocT de conception et plusieurs DocT de production.

2.2. La Documentation Technique de conception

La Documentation Technique de Renault permet de décrire de façon structurée l'ensemble des composants utilisés par famille de produits. En conception, la structuration de ces données permet, comme lors d'une analyse fonctionnelle, de dissocier les vues fonctionnelles, technologiques et physiques. Cette structure est construite autour d'éléments-clés qui précisent progressivement la diversité de composants. Ces éléments sont les suivants.

- Des **Familles**. La famille définit un périmètre de données dans l'architecture des bases de données. Lorsque des éléments sont communs à plusieurs familles de produits, ils seront dupliqués.
- Des **Fonctions**. Une description fonctionnelle des produits regroupés dans la Famille est donnée par la liste des Fonctions. Ces Fonctions ne sont pas des prestations telles que nous les avons vues au §1.2. Ces Fonctions sont techniques (versus commerciales) et donc définies à une maille plus fine. Pour illustrer le niveau de détail des Fonctions

techniques, nous pouvons citer la *Fonction étanchéité de la porte de coffre* ou encore la *Fonction fixation porte de coffre* par exemple.

- Des **Variantes**. Pour chaque Fonction, une diversité de niveaux de services portés par des Variantes peut être définie. Cette diversité complète la Fonction sans rentrer dans la définition technique du composant. L'ensemble des Variantes couvre nécessairement l'ensemble des produits de la famille.
- Des **Solutions**. À chaque Variante est allouée une ou plusieurs Solution(s). Ces solutions sont technologiques (versus fonctionnelles). Pour une Variante donnée, la diversité de Solutions peut s'expliquer par des différences de processus de production ou de composants dues : soit à une évolution dans le temps (par exemple, la solution 02 remplacera la solution 01 avec un chevauchement de deux mois pour écouler les stocks) ; soit à des écarts d'organisation entre plusieurs sites fabriquant la même famille de produits (par exemple, la solution 03 est allouée au site A car le fournisseur n'a pas le même procédé de fabrication).
- Des **Pièces Génériques**. À chaque Solution correspond une liste de sous-systèmes entrant dans sa composition appelés *Pièces Génériques* (PG). Une solution peut donc nécessiter plusieurs PGs et une PG peut être associée à différentes Solutions. La PG introduit la vision physique de la Documentation. La PG, définie au sens de Renault, est l'élément de la DocT qui peut en première instance se rapprocher le plus du concept d'ECA introduit Partie I Chapitre 2 §2.2. À la différence des Variantes et des Solutions qui n'existent pas indépendamment d'une Fonction, une PG est explicite indépendamment d'une Fonction. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle les PGs sont définies dans le glossaire de la Famille (cf. §1.2) comme les Fonctions. Pour donner une échelle de grandeur, la Direction R&D de Renault compte 46 000 PGs pour couvrir toutes ses familles.
- Des **Pièces**. Une *Pièce Générique* peut pointer vers une ou plusieurs *Pièce(s)* identifiée(s) par des *références* uniques et définies par des documents techniques (Plan, cahier des charges, etc). La diversité de *Pièce(s)* à ce niveau traduit :
 - Soit une diversité de couleur (par exemple, le rétroviseur qui reprend toutes les couleurs de carrosserie de la famille),
 - Soit une diversité de fournisseur (par exemple, à chaque envoi de commande, 40% des références seront approvisionnées par le fournisseur 1 et 60% par le fournisseur 2),

- Soit la nécessité de commander par lot (par exemple, on commande un lot de masses d'équilibrage des roues contenant des masses de 1, 2, 5 et 10g sans savoir exactement celles que l'on utilisera pour chaque véhicule).
- Des **Indices**. On définit un Indice pour faire évoluer dans le temps la définition d'une *Pièce*. En effet, tout au long du cycle de vie de la famille de produits, les *Pièces* sont souvent modifiées. Si le changement est important, c'est-à-dire s'il impose un changement de processus ou de fournisseur, il y a création d'une nouvelle *Pièce* avec une nouvelle référence. Si le changement est mineur, la *Pièce* ne changera pas de référence mais son Indice sera incrémenté. Cela permet une traçabilité de la Documentation Technique et une gestion des phases transitoires entre indices successifs en production (Gestion de stocks, mis au rebut, etc.).

Cette structuration de la DocT de conception, reprise dans la [Figure 16](#), est standard dans le groupe pour toutes les Familles.

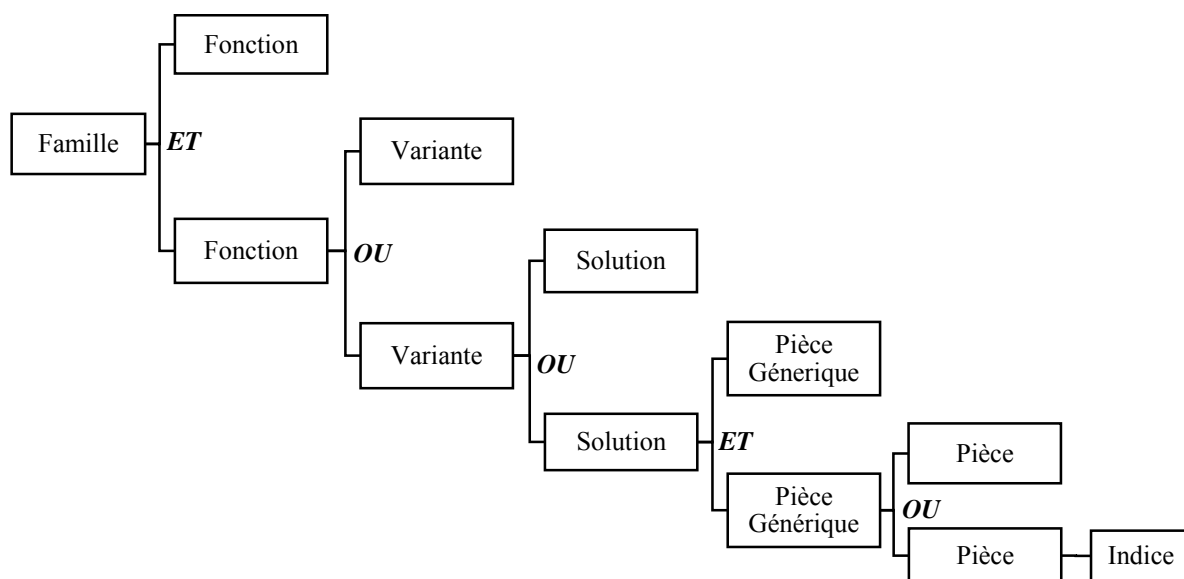


Figure 16 : Hiérarchie des éléments composant la Documentation Technique de conception

Quelques précisions peuvent être apportées sur cette structure brièvement présentée.

- Le nombre de Fonctions pour une Famille étant très important, il est nécessaire de les regrouper. Le découpage le plus utilisé chez Renault est un découpage métier calqué sur l'organisation des services du Département de la R&D.
- Les Fonctions et les PGs sont des éléments particuliers de cette structure. Ce sont des éléments de gestion clés utilisés par tous les métiers de l'entreprise, ils sont donc

codifiés par des dictionnaires interdisant la création d'instances locales. Les Fonctions sont définies par une ou plusieurs *PGs* dans ce dictionnaire.

- Dans le cas d'une diversité de *Pièces* pour une *PG* donnée, pour faciliter le calcul de besoin, un numéro d'approvisionnement est porté par la *PG*. Le numéro d'approvisionnement joue alors le rôle d'une pièce virtuelle. La répartition du volume à approvisionner se fait lors de l'explosion de cette pièce virtuelle par le système de calcul de besoin.
- Dans le cas d'une diversité de *Pièces* due à la couleur pour une *PG* donnée, on définit une *Pièce* neutre (sans couleur) et fictive qui porte les documents techniques (Plan, cahier des charges, etc.).

2.3. La Documentation Technique de production

La Documentation Technique de production peut être interprétée comme une liste de composants désignés par une référence et caractérisés par un certain nombre d'informations (nous en détaillerons certaines). La DocT de production est propre à chaque usine, elle est aussi définie pour une famille de produits. Elle résulte de l'application par une usine de la diversité définie par les ingénieurs dans la DocT de conception. Chaque usine applique uniquement les pièces qu'elle doit utiliser. En effet, étant donné que pour une famille donnée plusieurs usines peuvent assembler des diversités de produits finis, les usines n'ont pas besoin d'appliquer toute la diversité de composants définie par la Direction R&D. De plus, la Direction R&D peut parfois spécifier dans la DocT de conception un assemblé et les composants de cet assemblé alors que l'usine achète directement l'assemblé.

Parce que la DocT de production permet d'alimenter les systèmes informatiques définissant les gammes et les opérations des stations de la chaîne, il est utile de conserver l'arborescence fonctionnelle et technologique (*Fonction-Variante-Solution-Pièce Générique*) de chaque *Pièce*. En effet, une *Pièce* identifiée par une référence peut appartenir à différentes arborescences.

C'est dans la DocT de production que sont définis les liens de composition des assemblés. Un *assemblé* est une *Pièce* résultant de l'assemblage de plusieurs autres *Pièces*. Les *Pièces* de niveau 1 – c'est-à-dire les assemblés de plus haut niveau – sont consommées par les stations de la ligne de montage. Les *Pièces* de niveau inférieur sont alors utilisées par l'usine sur des chaînes secondaires qui peuvent être désynchronisées (présence d'un stock entre les deux chaînes) ou synchronisées (souvent représentées par des chaînes de production en arêtes de poisson). **Ce lien de composition est donc un lien « pièce-pièce » qui est défini pour chaque**

projet et par chaque usine. Le lien pièce-pièce définit de façon itérative une structure arborescente de la nomenclature telle qu'on la représente classiquement. La composition s'arrête au niveau où tous les composants sont achetés. Certains composants peuvent donc être de la matière première (par exemple x mètres de tôle acier de 1,2mm d'épaisseur).

La Documentation Commerciale est traduite en Documentation Technique de production au niveau des assemblés de niveau 1, c'est-à-dire au niveau des composants utilisés sur la ligne d'assemblage final. Ces *Pièces* particulières sont identifiées chez Renault par le biais d'un champ spécifique.

Le concept de composants alternatifs doit donc être associé non pas simplement à la référence mais à la clé primaire utilisée en DocT de production : la *Fonction-Variante-Solution-Pièce Générique-Pièce*. L'ensemble de composants alternatifs peut donc être assimilé à la *Fonction-Variante-Solution-Pièce Générique*.

Finalement, la DocT de production propre à chaque usine est donc constituée :

- D'une liste « à plat » de toutes les clés primaires, *Fonction-Variante-Solution-Pièce Générique-Pièce-Indice*, utilisées pour la famille considérée sur un site donné.
- De la liste de tous les assemblés décrivant leur composition sous la forme de lien pièce-pièce.

3. Documentation Commerciale

Dans ce paragraphe, nous allons décrire en détail la Documentation Commerciale. Dans un premier temps, nous étudierons le langage de définition de la diversité de produits utilisé par Renault (§3.1). Dans un second temps, nous étudierons comment est fait le lien entre un produit particulier exprimé dans la DocC et les composants nécessaires à sa production qui eux sont décrits dans la DocT (§3.2). Nous limiterons le cadre de la DocC étudié à une famille donnée de produits. Rappelons que nous nous plaçons dans un cadre temporel précis (cf Partie I Chapitre 2 §1.3).

3.1. Modélisation de la Documentation Commerciale de Renault

Au vu de la littérature, il apparaît maintenant clairement qu'il est inexploitable de décrire un véhicule particulier en utilisant seulement une vision organique telle que la proposent les nomenclatures modulaires (plus de 700 ECAs). L'étude de la Documentation de Renault confirme le besoin de définir une vision fonctionnelle et orientée client de la diversité de

produits comme le proposent van Veen et Wortmann (1992) (cf. analyse de la littérature Chapitre 3 §2). En effet, l'automobile est typiquement aujourd'hui le produit que le client - comme la Direction Commerciale pour les prévisions - définit à partir de prestations et non de composants (cf. l'ensemble des configurateurs internet des différentes marques). Comme pour Olsen et Saetre (1997), cette définition virtuelle (opposée à la définition organique en composants) de la famille permet de décrire complètement un produit fini unique. Il ne définit pas un produit physique particulier identifié par son numéro de châssis mais un produit commerciallement unique au sens donné d'un bien fongible en droit. C'est donc un véhicule virtuel unique parmi l'ensemble de la diversité offerte au client mais pouvant être produit en plusieurs exemplaires (qui ne résultent pas nécessairement de l'assemblage des mêmes composants), tous identiques et interchangeables du point de vue du client.

À la différence des nomenclatures génériques, la vue commerciale du produit n'est plus réduite à la définition de paramètres servant à choisir une alternative à chaque ECA d'une nomenclature. L'un des apports majeurs de cette approche est de proposer une vue indépendante de la structure de la nomenclature organique. Elle permet sans aucun appel à la nomenclature organique de la famille de produits :

- au client, de personnaliser son produit,
- au marketing, de définir l'offre commerciale,
- à la Direction Commerciale, de tarifier son offre commerciale, et d'établir, en coordination avec la Direction de la Production, le Plan Directeur de Production (nous le verrons au chapitre suivant),
- à la Direction de la Production, de donner une estimation du délai de livraison pour le client.

Historiquement, l'usage de paramètres a simplifié (cf. Chapitre 3 §2) l'établissement de la nomenclature des pièces composant un produit fini particulier. Mais le nombre de variantes de produits finis et le nombre de contraintes entre EPAs sont toujours en croissance forte. De plus, comme nous avons pu le constater chez Renault, les entreprises font face à une évolution temporelle très rapide de la diversité en composants (pour une famille de produits, plusieurs centaines de modifications de composants par mois). Ces évolutions de composants sont bien souvent invisibles pour le client (cf. §1.2). C'est ce qui a poussé les constructeurs automobiles à aller plus loin en construisant une Documentation Commerciale autonome d'une famille de produits.

La partie visible pour le client de la DocC est décrite dans un configurateur Web. Dans la Partie I Chapitre 2 §2, nous avons sans le dire explicitement à ce stade présenté une diversité de prestations. Lors d'une passation de commande d'un véhicule particulier, elle se résume par les informations contenues dans la Figure 17. Pour être non ambiguë en interne, cette description commerciale du véhicule doit être complétée pour préciser le cadre spatio-temporel particulier de cette commande.

Modèle	Version	Couleur	Option(s)
Clio IV break	1,5 dci (diesel) 90cv, intense	Bleu pacifique/toit ivoire	Pack techno

Figure 17 : Exemple d'expression de la Documentation Commerciale explicite pour le client passant une commande

La DocC, telle qu'on la connaît chez Renault aujourd'hui, est le résultat d'une évolution progressive. Historiquement, Renault, comme ses concurrents, a essayé de nommer les véhicules possibles avec des codes uniques dont les digits ont un sens. Cette première étape permettait de définir de manière non ambiguë un produit particulier commandé. Par exemple, on peut imaginer que le véhicule de la Figure 17 porte le code :

$$\begin{array}{ccccccc}
 V - CK2 - \underline{345EF1} - Z2 - \underline{R57P8} - \underline{FRAN} - 15110 \\
 \text{modèle} & \text{version} & \text{couleur} & \text{options} & \text{région commerciale} & \text{date de livraison souhaitée} \\
 & & & & \text{intense} \times \text{fr} \times \text{option en base} \\
 \text{où par exemple la version se décompose :} & 345 & \underline{EF1} \\
 & & 1,9l \text{ dci} \times \text{euro.6}
 \end{array}$$

Figure 18: Exemple de codification par groupes de caractères significants

Notons que ce code mentionne bien la diversité d'un point de vue de l'entreprise en explicitant notamment la région commerciale et la date souhaitée de livraison apportant le cadre spatio-temporel nécessaire à une définition non ambiguë de la diversité pour les Directions internes de l'entreprise. Elle explicite des critères de diversité non pertinents du point de vue d'un client particulier (commandant dans un pays donné) ou tout simplement non visibles par n'importe quel client. Par exemple, cela permet de définir le pays de commercialisation qui définit le côté de conduite, une norme de dépollution, la langue des étiquettes, etc.

Cette codification hexadécimale permet donc théoriquement l'usage de 36 possibles par digit (26 lettres et 10 chiffres), ce qui est considérable. Mais l'attribution d'un sens à chaque groupe de digits pour rendre la codification explicite réduit considérablement le nombre de véhicules exprimables avec ce type de code. Par exemple, la variante codée sur 6 digits pourrait permettre théoriquement plus de 2.10^9 ($=36^6$) codes de variantes uniques ; en pratique à cause du sens,

Renault arrivait à en exprimer de l'ordre de 10^5 . La diversité à laquelle sont aujourd'hui confrontés les constructeurs automobiles a rendu insuffisante cette approche. Une solution au problème est de perdre le caractère explicite de la DocT en utilisant toujours cette codification. C'est la solution que semble avoir retenu certains constructeurs comme Nissan. Cette solution n'a pas été retenue par Renault car la DocC devient illisible sans traducteur et que ces traducteurs deviennent de plus en plus lourds avec le temps.

Renault a donc développé, il y a une vingtaine d'années, un langage visant à rendre complètement explicite la définition du véhicule décrit par le commerce. Les ensembles de prestations alternatives décrivent la diversité de produits dans un langage structuré qui ne se rapporte pas à la composition physique du produit mais qui est explicite pour le client. À titre d'illustration, une automobile est définie au travers d'EPAs tels que la *motorisation*, le *niveau d'équipement*, la *peinture*, les *jantes*, la *climatisation*, *l'assistance au stationnement*, etc. La *motorisation* est un EPA regroupant toutes les principales caractéristiques (sur une fiche technique commerciale, par exemple) du moteur, et de nombreux composants (moteur, turbo, filtre, capteur, alternateur, etc.) qui lui sont assemblés. La définition d'un véhicule particulier par une liste de prestations alternatives est une approche plus longue que la première mais est plus puissante car elle permet d'exprimer une très grande diversité (sans tenir compte de contraintes, 100 EPAs à 2 PAs chacun permettent d'exprimer plus de 10^{30} combinaisons !).

C02 K02 E01 BVM5 DIES EU6 KX45 PO34 DG FRAN ABS
 modèle break intens manuel5rapports diesel euro.6 moteur1,9l avec FAP direction gauche France ABS

SSTO RETRE SSCAL HARM02 JAAL1 CTBP ...
 toit normal rétroviseurs élec ss ordinateur de bord sellerie noire jantes alu 16" Bleu pacifique

Figure 19 : Exemple de description complète et explicite en langage commercial

Comme l'illustre la [Figure 20](#), ces EPAs sont liés par des contraintes techniques ou commerciales similaires à celles liant les ensembles de composants alternatifs sur la [Figure 8](#). Ces contraintes commerciales ont les mêmes raisons d'être que celles introduites pour les ECAs. Nous en expliquerons les causes au [§3.2](#). Bien évidemment, ces contraintes à la libre combinaison des EPAs peuvent être décrites, elles aussi, par des prédicats comme illustré Partie II Chapitre 3 [§1](#). Malgré ces restrictions, le choix est encore vaste pour le client puisque, par exemple en France, Renault propose aux clients plusieurs millions de Twingo différentes.

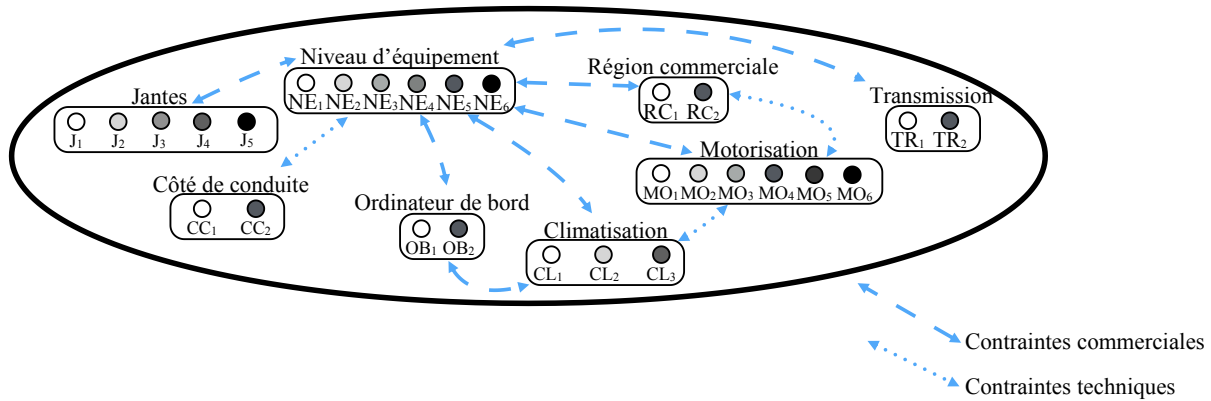


Figure 20 : Représentation d'ensembles de prestations alternatives (EPAs) et de leurs prestations associées

Par exemple, le *niveau d'équipement* définit des ensembles homogènes de niveaux de confort et de puissance du véhicule, liés à une segmentation du marché en termes d'attentes du client et de prix de vente. Le niveau d'équipement permet de spécifier certains composants visibles par le client (qualité des plastiques, forme du siège...), mais est surtout source de contraintes avec les autres EPAs puisqu'il conditionne la montée en gamme de manière globale. Par exemple, une motorisation puissante ne sera disponible qu'avec le haut de gamme imposant entre autres, par exemple, les sièges en cuir, le GPS intégré et la caméra de recul. L'usage de l'EPA niveau d'équipement, sorte de méta-EPA, permet à la fois de simplifier l'écriture des contraintes mais aussi de clarifier l'offre et la montée en gamme pour le client. Le niveau d'équipement peut être vu comme une « pseudo-prestation » si on fait un parallèle avec « le pseudo-item » de Bertrand *et al.* (2000), puisqu'il est la synthèse d'un certain nombre de prestations disparates. Ces restrictions à la libre combinaison de prestations alternatives peuvent être illustrées par le Tableau 4 qui est issu d'informations réelles telles que l'on peut les retrouver dans un configurateur web.

3.2. Mécanisme de détermination de la Documentation Technique par la Documentation Commerciale

Dès lors qu'il existe deux langages documentaires dans une entreprise, se pose la question de la traduction permettant le passage de l'un à l'autre. La question se pose au niveau opérationnel en phase de production, autant lors de la passation de commandes que lors de la définition de prévisions sur un horizon donné (sujet au cœur du chapitre suivant). En effet, la définition de prévisions est le fruit d'un travail séquentiel du commerce qui se base sur la Documentation Commerciale puis de la Direction de la Fabrication qui se base sur la Documentation Technique de production.

Le choix d'une motorisation par le client ne permet pas de déterminer de manière non équivoque les variantes de tous les composants à utiliser lors de l'assemblage final du système de motorisation (incluant le système de refroidissement, la boîte de vitesses, l'alternateur, etc.). L'usage d'un grand nombre de composants alternatifs est donc conditionné par le choix de plusieurs prestations alternatives appartenant à des ensembles différents.

Avant d'examiner l'impact du choix des prestations alternatives sur la détermination des composants du véhicule à produire, il est utile de noter quelques différences avec l'exemple de la Figure 8 qui explicite les restrictions à la libre combinaison des composants alternatifs. Le choix d'un CA est déterminé par celui d'une prestation alternative d'un EPA ou par une combinaison de prestations alternatives choisies dans autant d'EPAs, ce qu'illustre la Figure 21. On utilisera le terme de *détermination* pour désigner la relation causale liant l'utilisation d'un CA au choix d'une PA ou de plusieurs PAs. Dans cette approche des prestations, il convient de souligner que chacun des ensembles de composants alternatifs existants est déterminé par les choix effectués pour au moins un EPA.

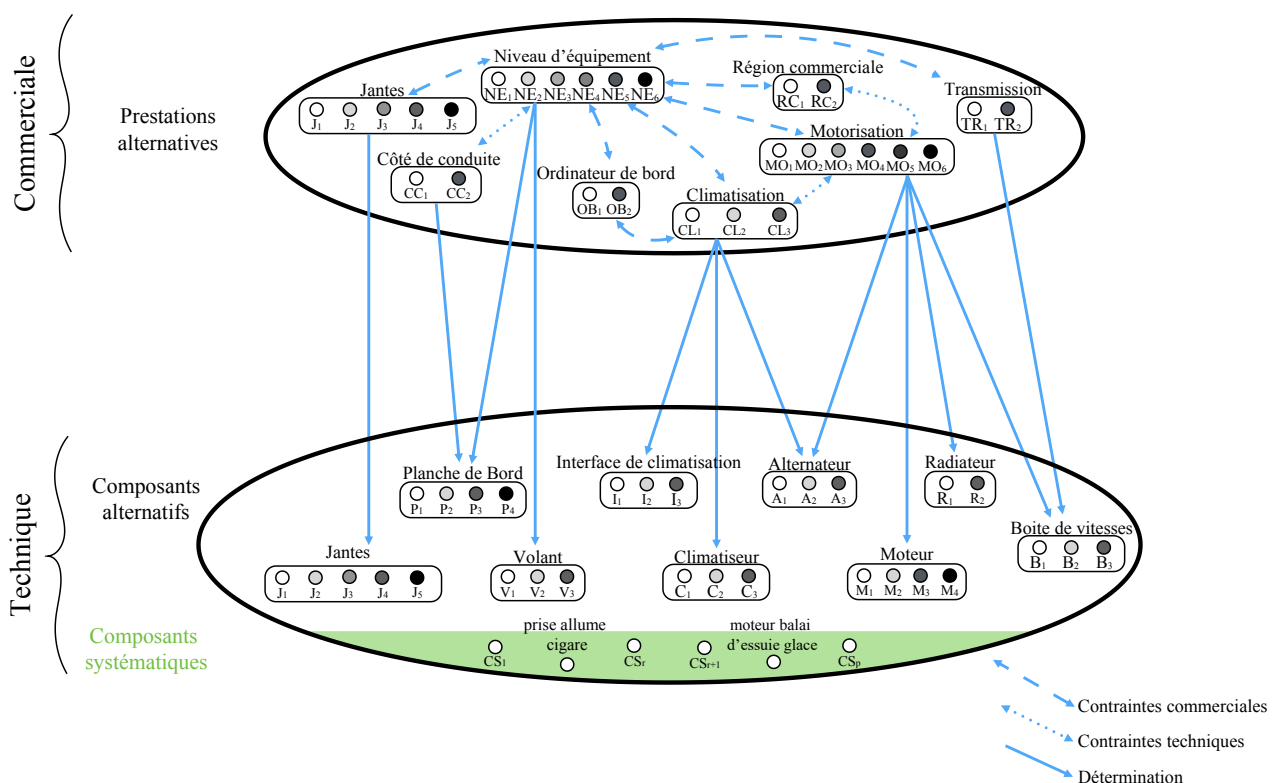


Figure 21 : Représentation de la détermination des ECA par les EPAs

Ces relations de détermination, visualisées par des flèches dans la Figure 21, doivent être explicitées. Lorsque le nombre d'EPAs définissant le choix d'un CA est faible, on peut expliciter cette détermination par des tableaux. À titre d'exemple, les trois tableaux suivants

permettent de mettre en évidence les combinaisons de prestations permettant, *in fine*, un choix non équivoque (une seule croix par colonne) de l'alternateur. Dans le dernier des trois tableaux, les cases grisées correspondent à des interdictions héritées des deux premiers tableaux et les cases blanches à des interdictions additionnelles liées à la prise en compte simultanée des deux EPAs dans la détermination de l'ECA Alternateur. À la différence de l'exemple de la Figure 10, le choix de l'alternateur ne se fait pas à partir des ECAs Moteur et Climatiseur mais à partir des choix de prestations Motorisation et Climatisation.

Tableaux 8 : Exemple d'une détermination de CAs (alternateurs) à partir de PAs (motorisation et climatisation)

		EPA MOrisation					
		MO ₁	MO ₂	MO ₃	MO ₄	MO ₅	MO ₆
ECA Alternateur	A ₁ ⁻¹	V	V	F	F	F	F
	A ₂ ⁻¹	F	V	V	V	V	F
	A ₃ ⁻¹	F	F	F	V	V	V

		EPA CLimatisation		
		CL ₁	CL ₂	CL ₃
ECA Alternateur	A ₁ ⁻¹	V	V	F
	A ₂ ⁻¹	V	V	V
	A ₃ ⁻¹	F	V	V

CL₁ : sans climatisation ; CL₂ : climatisation manuelle ; CL₃ : climatisation automatique

F : CA interdit par la PA MO ou CL

V V V Prédicat Vrai

EPA MOrisation	MO ₁			MO ₂			MO ₃			MO ₄			MO ₅			MO ₆		
EPA CLimatisation	CL ₁	CL ₂	CL ₃	CL ₁	CL ₂	CL ₃	CL ₁	CL ₂	CL ₃	CL ₁	CL ₂	CL ₃	CL ₁	CL ₂	CL ₃	CL ₁	CL ₂	CL ₃
MO _i ∧CL _j	MO ₁ ∧CL ₁	MO ₁ ∧CL ₂	MO ₁ ∧CL ₃	MO ₂ ∧CL ₁	MO ₂ ∧CL ₂	MO ₂ ∧CL ₃	MO ₃ ∧CL ₁	MO ₃ ∧CL ₂	MO ₃ ∧CL ₃	MO ₄ ∧CL ₁	MO ₄ ∧CL ₂	MO ₄ ∧CL ₃	MO ₅ ∧CL ₁	MO ₅ ∧CL ₂	MO ₅ ∧CL ₃	MO ₆ ∧CL ₁	MO ₆ ∧CL ₂	MO ₆ ∧CL ₃
ECA Alternateur	A ₁ ⁻¹	V	V	F	V	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
	A ₂ ⁻¹	F	F	F	V	V	V	V	F	V	V	V	F	V	F	F	F	F
	A ₃ ⁻¹	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	V	F	V	V

F : Faux (héritage de prédicats antérieurs)

F : Interdiction liée à combinaison MO_i et CL_j

V V V Prédicat Vrai

Les contraintes techniques liant les ensembles de prestations alternatives sont héritées des contraintes techniques liant les ensembles de composants alternatifs. Cet héritage s'explique par le fait que le choix d'une PA détermine celui d'un ou plusieurs CAs, comme l'illustre la Figure 21.

Au final, un véhicule commandé par un client est complètement défini par le choix d'une prestation alternative dans chacun des ensembles proposés. On parlera alors de produit (ou véhicule) complètement défini : PCD (ou VCD). La liste des prestations alternatives retenues ne correspond pas à une nomenclature, puisque les prestations ne correspondent que rarement à des composants, mais cette liste permet de déterminer sans difficulté l'ensemble des composants de niveau 1 à appeler au montage, grâce à une adaptation de la logique prédicative introduite précédemment.

Un configurateur, fondé sur le concept de prestation, permet de guider le choix d'un client potentiel à travers les EPAs offerts. Il faut noter qu'un configurateur doit prendre en compte ces contraintes de restriction à la libre combinaison des prestations en restreignant dynamiquement l'éventail des choix restant à faire par le client, compte tenu des prestations

qu'il a déjà sélectionnés. La faisabilité informatique de la prise en compte des contraintes, sans obliger un ordre de choix au client au travers le configurateur, est une question déjà traitée dans la recherche et par les entreprises (Renault semble être l'entreprise de référence en la matière pour ce secteur) et elle ne sera pas évoquée ici.

La généralisation de la définition des prédicats faite au Chapitre 3 §1 aux prestations alternatives est triviale. On peut alors définir maintenant CA_i^{-1} comme étant le prédicat vrai si le composant alternatif CA_i peut être monté sur un véhicule, sa présence étant conditionnée par celle d'une combinaison de prestations alternatives PA_i , choisies parmi plusieurs ensembles possibles. Dans ce cadre, les trois prédicats introduits précédemment (cf. Chapitre 3 §1) pour conditionner le choix d'un alternateur sur un véhicule à la présence d'autres CAs peuvent être remplacés par les prédicats suivants qui lient cette existence au choix de PAs :

$$A_1^{-1} = (MO_1 \wedge (CL_1 \vee CL_2)) \vee (MO_2 \wedge CL_1)$$

$$A_2^{-1} = (CL_1 \wedge MO_3) \vee (CL_2 \wedge (MO_2 \vee MO_3 \vee MO_4 \vee MO_5)) \vee (MO_4 \wedge CL_3)$$

$$A_3^{-1} = (CL_2 \wedge MO_5) \vee (CL_3 \wedge (MO_5 \wedge CL_6))$$

Pour un véhicule, l'alternateur à utiliser sur la ligne d'assemblage correspond à l'unique alternateur i tel que $A_i^{-1} = \text{vrai}$ dans l'ECA considéré. La généralisation de ce principe conduit à évaluer autant de prédicats qu'il existe de composants alternatifs dans chaque ECA, un seul pouvant être vrai puisque les CAs d'un ensemble sont nécessairement exclusifs. Cette exploration ne pose guère de problème d'un point de vue pratique. Les prédicats introduits au Chapitre 3 §1 ne permettent pas de définir les composants alternatifs à monter sur le poste d'assemblage sans faire appel de manière récursive à la nomenclature exacte du véhicule. Il faut rappeler que l'alternateur est un composant généralement méconnu du client alors que les choix des prestations de motorisation et de climatisation, qui ont un sens concret pour lui, permettent de déterminer l'alternateur à utiliser dans le véhicule qu'il configure sans intervention directe de sa part. Cette possibilité constitue l'un des avantages importants de cette approche de la définition du produit par des prestations alternatives.

Les prédicats ne sont utilisés chez Renault dans le processus de planification des approvisionnements que pour les *Pièces* de niveau 1 dans la Documentation Technique de production (cf. §1.2.2 et §2.3). Ils sont pourtant définis pour toutes les *Pièces* dans la Documentation Technique de conception car la définition des *Pièces* de niveau 1 est propre à

chaque usine. La définition de prédicats pour toutes les *Pièces* en conception est un travail lourd qui ne peut pas être complètement automatisé (aucun logiciel ne sait dire sans intervention humaine quelles combinaisons de PAs, la *Pièce* nouvellement conçue permet de satisfaire). En revanche, cela permet à des algorithmes de tester l'exhaustivité et la non-dualité de la Documentation Technique par rapport à la Documentation Commerciale. Cela est très utile car la fiabilité de la nomenclature est une condition nécessaire à la qualité de la production et qu'une vérification à la main serait impossible compte tenu de la cardinalité des deux ensembles.

Les implications opérationnelles de cette description du produit par des prestations alternatives sont multiples ; les deux premières apportent des éléments de réponse aux questions posées en introduction de cette seconde partie.

- Le configurateur, fondé sur le concept de prestation alternative, permet de guider le choix d'un client potentiel à travers les EPAs offerts. Dans ce cadre, les choix restant à faire sont conditionnés par ceux déjà effectués et tiennent compte des contraintes liant les prestations, afin de garantir la fabricabilité du véhicule voulu par le client. Dans cette perspective, l'appel aux nomenclatures classiques est inutile à la fois par le configurateur mais aussi pour satisfaire les besoins de la Direction Commerciale.
- La description d'un véhicule par l'ensemble des prestations alternatives qu'il fournit permet facilement, par l'intermédiaire des prédicats, de déterminer les composants qui le composent. **Cela permet d'éviter l'appel récursif** et donc sans solution des CAs comme c'était le cas avec la nomenclature modulaire (au Chapitre 3 §1). Les besoins opérationnels du court terme sont donc correctement couverts par cette solution et, dans cette perspective, il est également inutile d'explicitier l'ensemble des nomenclatures de tous les produits qu'il est possible de produire.
- L'explicitation des contraintes de combinaisons exprimées non plus par des combinaisons de composants alternatifs mais avec des prestations alternatives **condense l'écriture des prédicats**.
- Par rapport à la nomenclature générique, cette approche permet de rendre autonome la Documentation Commerciale de la structure de la Documentation Technique. Cela est important pour deux raisons principales. D'abord, pour optimiser les deux structures en fonction des besoins des utilisateurs spécifiques (par exemple, la dimension spatiale est d'un côté la région commerciale et de l'autre, l'usine). Ensuite, pour **limiter les impacts de la dynamique des diversités** commerciales et techniques (concrètement, le nombre de changements à faire dans la Documentation).

Cette approche de description du produit fini par des prestations et des prédicats répond donc parfaitement aux besoins de la Direction Commerciale. Elle est difficilement contournable dans la préparation de décisions tactiques car la planification de la production, au-delà de l'horizon gelé, ne peut que reposer sur des prévisions commerciales portant sur des prestations.

Chapitre 5. Impacts sur la planification

La construction des Plans Directeurs de Production (PDPs) des usines d'assemblage final s'appuie sur la nomenclature des produits. Tant que l'on reste dans le périmètre de l'horizon gelé, les besoins en composants de niveau 1 se déterminent sans problème à partir des nomenclatures des véhicules commandés. On peut noter que beaucoup d'industriels bornent arbitrairement cet horizon gelé, sans le moduler en fonction de l'importance des carnets de commandes qui peuvent varier fortement d'une famille de produits à une autre. Au-delà de l'horizon gelé, la construction du PDP des usines d'assemblage final est plus compliquée. Il en est de même pour la construction des PDPs des usines de la chaîne logistique situées en amont, lorsque leurs demandes, qui résultent de la combinaison des mécanismes d'explosion des nomenclatures et d'absorption des délais, sont tirées par une partie des PDPs des usines d'assemblage se trouvant au-delà de l'horizon gelé.

La cohérence des décisions de production prises dans la partie de la chaîne logistique située en amont des lignes d'assemblage final dépend donc fortement de la fiabilité des PDPs de ces lignes au-delà de l'horizon gelé et de la stabilité de ces informations dans le cadre de la planification glissante. Habituellement, lorsque la diversité de produits finis est relativement faible, les PDPs s'établissent au niveau des produits finis (niveau 0 des nomenclatures). Lorsqu'elle devient trop importante, il semble plus facile de les établir sur les composants de niveau 1 beaucoup moins nombreux. Dans les deux cas, les contraintes à la libre combinaison des prestations alternatives, qui se répercutent sur les composants alternatifs, compliquent singulièrement la définition de ces PDPs (§1). Si ces PDPs portent sur les CAs du niveau 1, il suffit de traiter séparément chaque composant alternatif en se limitant aux seules contraintes qui le concernent (§2). Si les PDPs portent sur les produits finis, on est obligé de prendre en compte l'ensemble de ces contraintes en les transcrivant au niveau des CAs (§3).

1. Positionnement du problème de construction des PDPs en production de masse de produits fortement diversifiés

En production de masse fortement diversifiée, l'établissement des PDPs d'une ligne d'assemblage repose d'abord sur une connaissance préalable du volume total de production, pour chacune des périodes de l'horizon de planification. Ce type de lignes étant caractérisé par un temps de cycle fixe, cette production résulte du temps de fonctionnement de la ligne, lequel peut dépendre du nombre d'équipes se succédant au cours de chaque période à venir. Pour des

raisons de gestion du personnel mais aussi des approvisionnements, ces informations sont nécessairement anticipées sur l'horizon de planification et donc supposées connues ici.

La variété de la production rend difficile la détermination des PDPs au niveau des produits finis car il faut alors effectuer des prévisions au niveau de toutes les combinaisons autorisées des composants alternatifs à l'origine de cette diversité. Cette difficulté peut être atténuée car il n'est pas nécessaire de travailler au niveau de détail le plus fin dans la perspective du pilotage des approvisionnements qui est au cœur de la planification. En effet, la variété induite par certains ECAs, comme celui des *stickers*, peut sans problème être ignorée dans le processus de planification à condition que ces CAs soient relativement de faibles valeurs et faciles à approvisionner. La variété résiduelle de produits finis reste cependant très forte dans l'industrie automobile, mais cela n'empêche pas certaines entreprises de ce secteur d'utiliser un mécanisme de création du PDP à ce niveau de détail, comme on l'examinera au §2. Les difficultés posées dans la construction d'un tel mécanisme incluent aussi celles rencontrées dans l'établissement du PDP sur les composants de niveau 1, lorsqu'ils sont déterminés par plusieurs PAs.

L'établissement des PDPs des composants de niveau 1 systématiquement montés sur un véhicule est immédiat car ils dépendent d'informations certaines : coefficients de nomenclature et production totale des périodes à venir. Pour les autres composants de niveau 1, c'est-à-dire les CAs, la nomenclature de planification introduite au Chapitre 4 §3.2 et le volume de production sont à la base de la détermination du PDP au-delà de l'horizon gelé. Rappelons qu'une nomenclature de planification est définie pour chaque ECA pour une période donnée : à chaque composant alternatif d'un ensemble est associé un coefficient de nomenclature correspondant à la part en termes de pourcentage d'utilisation, que représente ce CA dans cet ensemble dans la période considérée. Si on fait l'hypothèse que ces coefficients de nomenclature sont correctement déterminés – hypothèse forte sur laquelle on reviendra dans le paragraphe suivant – deux approches de calcul du PDP au-delà de l'horizon gelé peuvent être envisagées :

- On peut noter que la première solution a été proposée lors de l'introduction des nomenclatures de planification dans la MRP. Les réquisitions d'une période située au-delà de l'horizon gelé sont alors calculées comme le produit du volume total de production de la période, par les coefficients de nomenclature des CAs. Ce calcul repose implicitement sur l'hypothèse d'une production en *univers certain* ; dans le cadre de la planification glissante, les demandes calculées au-delà de l'horizon gelé ne sont pas

modifiables. Cette hypothèse est fort peu réaliste. Pour contrer les perturbations en cascade que ces modifications de PDPs génèrent dans la chaîne logistique en amont des lignes d'assemblage, il faut nécessairement faire appel à des stocks de sécurité pour ces CAs. Leur détermination manque souvent de rigueur, défaut que ne possède pas la seconde solution.

- Cette seconde solution s'appuie sur une *conception probabiliste* de la demande des composants au-delà de l'horizon gelé. Les coefficients d'une nomenclature de planification d'un ECA sont alors traités comme le vecteur de probabilité d'une distribution Multinomiale, dans laquelle le nombre d'épreuves correspond au nombre total de véhicules produits au cours de cette période (Giard et Camisullis 2010, Giard et Sali 2012, Sali et Giard 2015). La demande d'un CA pour une période au-delà de l'horizon gelé peut alors être traitée comme une variable aléatoire suivant une loi Binomiale et le calcul du stock de sécurité peut se faire par la détermination d'un niveau de recombplètement associé à un risque de rupture de stock prédéterminé. Dans ce contexte, on montre que les Besoins Bruts d'un composant de niveau supérieur à 1, tirés par des demandes aléatoires des PDPs situées au-delà de l'horizon gelé, sont des variables aléatoires définies comme des sommes pondérées de ces demandes aléatoires (Giard et Sali 2012 ; Sali et Giard 2015).

La pertinence de ces deux approches repose sur la qualité des prévisions faites sur les coefficients de nomenclature. Lorsque le nombre d'ECAs est faible et qu'aucune contrainte ne pèse sur la libre combinaison des composants alternatifs, on peut établir facilement les prévisions des coefficients de nomenclature à partir de leurs historiques. Les techniques de lissage exponentiel sont appropriées lorsque ces évolutions structurelles sont lentes et les délais d'obtention relativement courts ; ces prévisions doivent être corrigées pour tenir compte de perturbations prévisibles sur l'évolution du marché liées à l'arrivée de nouveaux modèles et à l'impact d'actions commerciales lancées par l'entreprise ou par la concurrence. S'il existe des contraintes entre composants, l'utilisation de ces approches ne peut être envisagée que s'il est raisonnable de postuler une stabilité des caractéristiques structurelles de la demande.

Le problème est beaucoup plus compliqué dans le contexte d'une production de masse fortement diversifiée, en raison de la diversité des produits et d'importantes restrictions pesant sur la libre combinaison des CAs. On a vu au chapitre précédent que, pour des raisons de structuration de l'offre commerciale et d'incapacité du client à définir sa demande à partir de CAs, il était préférable de remplacer la nomenclature classique, listant les composants d'un

véhicule donné, par une liste de prestations. L'équivalence opérationnelle de ces deux descriptions est assurée par la détermination de chaque CA par un prédicat combinant un sous-ensemble de PAs permettant de définir le produit. Cette solution répond parfaitement aux besoins opérationnels de la production. Se pose alors la question de l'utilisation des PAs pour définir le PDP des CAs au-delà de l'horizon gelé.

On peut transposer sans problème aux EPAs le principe des nomenclatures de planification utilisé pour les ECAs et reprendre ainsi les méthodes de prévision évoquées ci-dessus pour les ECAs. C'est du reste plus facile puisque les EPAs, moins nombreux que les ECAs, ont été définis pour répondre à des préoccupations commerciales, alors que les ECAs correspondent à une vision technique. Il convient alors de distinguer trois cas de figure résumés dans le [Tableau 9](#).

- Si le délai d'approvisionnement d'un composant est inférieur à l'horizon gelé, il est inutile d'établir le PDP au-delà de cet horizon gelé. De la même façon, l'établissement du PDP des composants systématiques est immédiat puisqu'il est fonction d'informations certaines : volume de production et coefficient de nomenclature.
- Si le délai d'approvisionnement d'un composant est supérieur à l'horizon gelé, le calcul du PDP au-delà de l'horizon gelé est nécessaire. Deux situations doivent être alors distinguées :
 - Le CA est déterminé par un EPA unique. Si tel est le cas, sa prévision est immédiatement déduite de celle des PAs de cet EPA.
 - Le CA est déterminé par plusieurs EPAs. Dans ce cas, le problème de la détermination du coefficient de nomenclature du CA à utiliser se pose, même si tous les coefficients de nomenclature des PAs ont fait l'objet d'une prévision. En effet, l'existence la combinaison de prestations appartenant à des ensembles différents dans son prédicat pose un problème redoutable, comme nous allons le voir ci-après.

Tableau 9 : Typologie des problèmes d'établissement du PDP d'un composant de niveau 1

		Composants systématiquement montés	Nombre d'EPAs impliqués dans la détermination des ECAs	
			1	≥ 2
Délai d'obtention	\vee Horizon Gelé	Approvisionnement ou production synchrone parfois possible mais pas forcément nécessaire	Approvisionnement ou production synchrone souhaitable autant que possible	Approvisionnement ou production synchrone souhaitable autant que possible
	\wedge Horizon Gelé	Approvisionnement reposant sur les seules prévisions de volumes de production	Approvisionnement s'appuyant sur les nomenclatures de planification des prestations	Approvisionnement s'appuyant sur un pilotage complexe à définir

Illustrons les difficultés engendrées par la détermination de prévisions d'un CA déterminé par un prédicat faisant intervenir plusieurs EPAs. Le [Tableau 10](#) reprend les informations des [Tableaux 8](#) et permet de montrer concrètement comment chaque alternateur est déterminé par une combinaison des prestations de motorisation et de climatisation. Les trois prédicats de détermination des trois « Alternateur » alternatifs ont été reportés en dessous de ce tableau.

Tableau 10 : Détermination des alternateurs à partir des prestations de motorisation et de climatisation

		EPA MO torisation					
		MO ₁	MO ₂	MO ₃	MO ₄	MO ₅	MO ₆
EPA CL imatisation	CL ₁	A ₁	A ₁	A ₂	-	-	-
	CL ₂	A ₁	A ₂	A ₂	A ₂	A ₂	A ₃
	CL ₃	-	-	-	A ₂	A ₃	A ₃

$$A_1^{-1} = (MO_1 \wedge (CL_1 \vee CL_2)) \vee (MO_2 \wedge CL_1)$$

$$A_2^{-1} = ((MO_2 \vee MO_3 \vee MO_4 \vee MO_5) \wedge CL_2) \vee (MO_3 \wedge CL_1) \vee (MO_4 \wedge CL_3)$$

$$A_3^{-1} = ((MO_5 \vee MO_6) \wedge CL_3) \vee (MO_6 \wedge CL_2)$$

Si on adopte les conventions usuelles en probabilité pour décrire les coefficients de nomenclature des CAs et des PAs, on aboutit au [Tableau 11](#) qui décrit les composantes du calcul des coefficients des CAs des alternateurs, à partir des coefficients des prestations de motorisation et de climatisation ; ces relations de calcul figurent en dessous du tableau et font intervenir les 12 valeurs non nulles de ce tableau (hors distributions marginales).

Tableau 11 : Détermination des coefficients de nomenclature des alternateurs à partir des prestations motorisation et climatisation

		EPA M ^o torisation						
		MO ₁	MO ₂	MO ₃	MO ₄	MO ₅	MO ₆	MO _{Ensemble}
EPA C ^l imatisation	CL ₁	P(MO ₁ ∧CL ₁)	P(MO ₂ ∧CL ₁)	P(MO ₃ ∧CL ₁)	-	-	-	P(CL ₁)
	CL ₂	P(MO ₁ ∧CL ₂)	P(MO ₂ ∧CL ₂)	P(MO ₃ ∧CL ₂)	P(MO ₄ ∧CL ₂)	P(MO ₅ ∧CL ₂)	P(MO ₆ ∧CL ₂)	P(CL ₂)
	CL ₃	-	-	-	P(MO ₄ ∧CL ₃)	P(MO ₅ ∧CL ₃)	P(MO ₆ ∧CL ₃)	P(CL ₃)
	CL _{Ensemble}	P(MO ₁)	P(MO ₂)	P(MO ₃)	P(MO ₄)	P(MO ₅)	P(MO ₆)	100%

$$P(A_1) = P(MO_1 \wedge CL_1) + P(MO_2 \wedge CL_1) + P(MO_1 \wedge CL_2)$$

$$P(A_2) = P(MO_2 \wedge CL_2) + P(MO_3 \wedge CL_1) + P(MO_3 \wedge CL_2) + P(MO_4 \wedge CL_2) + P(MO_4 \wedge CL_3) + P(MO_5 \wedge CL_2)$$

$$P(A_3) = P(MO_5 \wedge CL_3) + P(MO_6 \wedge CL_2) + P(MO_6 \wedge CL_3)$$

Les 3 P(CL_j) et les 6 P(MO_i) étant réputées connues (marge du [Tableau 11](#)), la détermination des coefficients de nomenclature revient donc à trouver une solution au système suivant à 9 équations et 12 inconnues suivant :

$$P(CL_1) = P(MO_1 \wedge CL_1) + P(MO_2 \wedge CL_1) + P(MO_3 \wedge CL_1)$$

$$P(CL_2) = P(MO_1 \wedge CL_2) + P(MO_2 \wedge CL_2) + P(MO_3 \wedge CL_2) + P(MO_4 \wedge CL_2) + P(MO_5 \wedge CL_2) + P(MO_6 \wedge CL_2)$$

$$P(CL_3) = P(MO_4 \wedge CL_3) + P(MO_5 \wedge CL_3) + P(MO_6 \wedge CL_3)$$

$$P(MO_1) = P(MO_1 \wedge CL_1) + P(MO_1 \wedge CL_2)$$

$$P(MO_2) = P(MO_2 \wedge CL_1) + P(MO_2 \wedge CL_2)$$

$$P(MO_3) = P(MO_3 \wedge CL_1) + P(MO_3 \wedge CL_2)$$

$$P(MO_4) = P(MO_4 \wedge CL_2) + P(MO_4 \wedge CL_3)$$

$$P(MO_5) = P(MO_5 \wedge CL_2) + P(MO_5 \wedge CL_3)$$

$$P(MO_6) = P(MO_6 \wedge CL_2) + P(MO_6 \wedge CL_3)$$

On est donc en présence d'un système sous-déterminé acceptant une infinité de solutions, insuffisant donc pour déterminer les coefficients de nomenclature des alternateurs. Cette sous-détermination est systématique lorsqu'un CA est déterminé par deux EPAs ou plus, sauf dans le cas peu probable où les prédicats de détermination de chaque CA d'un ensemble ne font intervenir qu'une seule prestation par EPA impliqué dans cette détermination. Pour obtenir une solution permettant d'établir le PDP des alternateurs au-delà de l'horizon gelé, il faut introduire 3 contraintes supplémentaires ou ajouter un mécanisme d'optimisation pour lever cette sous-détermination ; la seconde possibilité sera illustrée au [Tableau 12](#). Ces deux mécanismes introduisent une part d'arbitraire dans la détermination de la solution.

Comme nous l'avons indiqué précédemment, dans le cas d'une production de masse fortement diversifiée, le PDP peut être établi au niveau des composants de niveau 1 (§2) ou des produits finis (§3). On a distingué deux usages possibles des coefficients des nomenclatures de planification pour définir le PDP : une approche déterministe et une approche stochastique. Dans la méthode d'établissement du PDP au niveau des références de niveau 1, on s'appuiera

sur une vision probabiliste des réquisitions du PDP au-delà de l'horizon gelé. L'établissement de PDP au niveau des références de produits finis, solution retenue par certains constructeurs automobiles, repose sur une approche déterministe.

2. Détermination du PDP au niveau 1 de la nomenclature

Le [Tableau 9](#) permet de restreindre le problème de la définition du PDP des composants de niveau 1 en écartant les composants systématiques et ceux dont le délai d'obtention ne dépasse pas l'horizon gelé. Le problème se pose donc pour les composants ne rentrant pas dans ces catégories. Dans ce paragraphe, on suppose que ces CAs sont déterminés par un ou plusieurs EPAs.

Lorsque l'on dispose de prévisions sur les coefficients de nomenclatures d'un ECA, il est possible d'utiliser l'approche probabiliste de la définition du PDP au-delà de l'horizon gelé (cf. [§1](#)). Pour appliquer cette solution, il faut disposer de valeurs prévisionnelles des coefficients de nomenclature des CAs. Trois cas de figure peuvent être distingués.

- Cas 1. Les coefficients de nomenclature d'un ECA sont calculés à partir de ceux des EPAs qui le déterminent.
- Cas 2. Les coefficients de nomenclature d'un ECA peuvent être calculés sans passer par les EPAs, en partant directement de leurs historiques. Dans ce cas, il est inutile d'effectuer des prévisions pour les EPAs qui déterminent uniquement ces ECAs.
- Cas 3. L'approvisionnement des CAs d'un ECA peut ne pas être piloté par la MRP mais par un système ne reposant pas sur des prévisions, par exemple, sur une politique de type « point de commande – quantité de commande ». Cette solution est utilisée pour gérer les composants dont la gestion est exclue du PDP, comme indiqué au début du [§1](#).

2.1. Cas 1 - Coefficients de nomenclature d'un ECA calculés à partir de ceux d'EPAs

Le premier cas implique la connaissance des nomenclatures des EPAs qui déterminent ceux des ECAs auxquels on s'intéresse par l'intermédiaire des prédicats. On dispose donc des valeurs prévisionnelles des coefficients de nomenclature des EPAs nécessaires à la prévision des coefficients des ECAs pris en compte dans le PDP. Il convient alors de distinguer deux possibilités :

- Le CA est déterminé par un EPA unique. Le coefficient de nomenclature de ce CA est immédiatement donné par ceux de cet EPA qui le détermine. Il est alors possible d'utiliser l'approche probabiliste rappelée au §1, utilisant un risque de rupture de stock arbitrairement faible pour déterminer les lancements en production de composants devant couvrir des besoins partiellement ou totalement aléatoires. Cette approche a fait l'objet d'une dizaine de benchmarks sur des cas réels pour une entreprise automobile (Giard et Sali 2012, Sali et Giard 2015) en comparant les résultats avec ceux tirés d'une exploitation de la solution d'établissement du PDP au niveau du produit fini décrite en §3. La supériorité de l'approche aléatoire est nette.
- Le CA est déterminé par plusieurs EPAs, le problème de la prévision du coefficient de nomenclature du CA est nettement plus compliqué comme on l'a montré à la fin du §1. On peut chercher à résoudre le problème de sous-détermination mis en évidence à la fin du §1 en passant par une fonction à optimiser. En reprenant l'exemple des Tableaux 8, on peut imaginer chercher des valeurs prévisionnelles des $R(CL_i \wedge MO_j)$ qui minimisent un indicateur d'écart entre ces prévisions et les dernières valeurs $R_0(CL_i \wedge MO_j)$ historiquement observées. Cette méthode est illustrée par le Tableau 12 qui s'appuie sur l'exemple des Tableaux 8, et utilise le critère
$$\text{Min} \sum_j [R(CL_i \wedge MO_j) - R_0(CL_i \wedge MO_j)]^2$$
 pour lever la sous-détermination. Le tableau de gauche correspond au tableau « historique » des coefficients de croisement des PAs. Celui de droite fournit les prévisions effectuées sur les structures des prestations de motorisation et de climatisation (distributions marginales) et la solution qui minimise le critère retenu, sous contrainte de respect des marges (cf. les 9 équations données précédemment). On peut souligner que cette méthode est utilisée ici localement (pour un CA unique) et donc de manière différente de celle qui sera décrite au §3. En effet, elle ne met en jeu, pour la définition des coefficients d'un ECA, que les seuls EPAs concernés et ne cherche plus à définir les coefficients de l'ensemble des ECAs dans le même calcul. Un EPA peut donc être mobilisé autant de fois que nécessaire. Cette approche n'a pas été exploitée à notre connaissance.

Tableau 12 : Exemple numérique de détermination des coefficients de nomenclature des alternateurs à partir de ceux des prestations motorisation et climatisation avec critère de minimisation

		Coefficients initiaux							Coefficients prévisionnels							Structure CLimatisation prévue
		EPA : Motorisation							EPA : Motorisation							
		MO ₁	MO ₂	MO ₃	MO ₄	MO ₅	MO ₆	MO _{Ensemble}	MO ₁	MO ₂	MO ₃	MO ₄	MO ₅	MO ₆	MO _{Ensemble}	
EPA																
CLimatisation	CL ₁	0,020	0,100	0,120				0,240	0,02667	0,06667	0,10667				0,200	
	CL ₂	0,090	0,120	0,080	0,050	0,095	0,085	0,520	0,07333	0,10333	0,05333	0,04333	0,09334	0,08333	0,450	
	CL ₃				0,080	0,085	0,075	0,240				0,12667	0,10666	0,11667	0,350	
	CL _{Ensemble}	0,110	0,220	0,200	0,130	0,180	0,160	1,000	0,1000	0,1700	0,1600	0,1700	0,2000	0,2000	1,000	
									Structure Motorisation prévue							
		P(A ₁)=0,17 ; P(A ₂)=0,56 ; P(A ₃)=0,26							P(A ₁)=0,1667 ; P(A ₂)=0,5267 ; P(A ₃)=0,3067							

2.2. Cas 2 - Calcul des coefficients de nomenclature d'un ECA à partir de son historique

On s'intéresse avant tout ici au cas d'un composant déterminé par plusieurs EPAs, le cas d'un composant déterminé par un seul EPA ayant été traité implicitement dans le cas 1. La solution retenue consiste à effectuer directement des prévisions du coefficient de cet ECA. Plutôt que de reprendre les dernières valeurs observées des coefficients des EPAs concernés, il est possible d'utiliser une technique de lissage exponentiel simple fournissant directement les prévisions $\hat{P}_{t'>t}(CA_i) = \alpha \cdot P_t(CA_i) + (1-\alpha) \cdot \hat{P}_{t-1}(CA_i)$ des coefficients de l'ECA pour les périodes postérieures à t . Dans ces calculs, la contrainte $\sum_i \hat{P}_{t'>t}(CA_i) = 1$ doit être respectée. Ceci est garanti à l'initialisation du processus de calcul du lissage exponentiel qui utilise des coefficients dont la somme est nécessairement égale à 1 ; ensuite, cette propriété est nécessairement conservée parce que les prévisions des coefficients d'une même famille de produits utilisent toutes le même coefficient de lissage. L'usage de cette technique de lissage exponentiel suppose que l'évolution de la structure soit lente et que les délais d'approvisionnement soient relativement courts, sinon la Direction Commerciale devrait effectuer une prévision explicite. Deux remarques complémentaires peuvent être formulées. La valeur du coefficient de lissage α utilisée dans les prévisions des coefficients d'un EPA peut être périodiquement ajustée, par exemple sur la base d'un critère de minimisation de la somme des carrés des erreurs de prévision. D'autre part, l'utilisation d'un filtre linéaire génère toujours des oscillations connues sous le nom d'effet Slutsky-Yule, lesquelles induisent un biais dans la prévision (Kendall, 1976). On peut facilement contrer ce biais en majorant la prévision par une quantité liée à l'écart-type des erreurs de prévision, ce qui contre le risque de sous-évaluation si la prévision

se trouve sur la partie haute d'une oscillation (ce qui ne peut être connu qu'avec du recul), au prix de la constitution d'un stock de sécurité excessif dans le cas contraire.

Cette approche a fait l'objet d'un benchmark en temps réel pendant trois mois dans une usine d'assemblage sur l'approvisionnement de faisceaux électriques dont l'ECA mobilise plusieurs EPAs ; cette comparaison avec le système en place, s'inspirant de la démarche décrite au paragraphe suivant, a montré une supériorité nette de l'approche probabiliste basée sur des prévisions directes des 17 faisceaux susceptibles d'être montés (Camisullis 2008, Camisullis *et al.* 2010).

3. Détermination du PDP au niveau 0 de la nomenclature

La solution itérative préconisée par certains constructeurs automobiles consiste à traiter progressivement les prévisions commerciales exprimées à la maille des prestations pour aboutir à des prévisions au niveau des produits finis (niveau 0 de la nomenclature). Chaque produit fini est décrit par une liste de PAs couvrant tous les EPAs. Les prédicats sont alors utilisés pour traduire cette description fonctionnelle en une description physique permettant de connaître les CAs consommés pour la fabrication de ce véhicule. Les informations commerciales exprimées au niveau des EPAs consistent en des coefficients de prévision pour chaque PA. Le passage d'une prévision au niveau des prestations à une prévision au niveau des produits finis consiste à combiner de manière itérative les PAs des EPAs pour progressivement enrichir la définition d'un objet qui, en fin de parcours, devient un produit fini. La combinaison des PAs d'EPAs donne lieu à des résolutions successives de systèmes d'équations permettant de calculer des coefficients de prévision qui sont, la plupart du temps, sous-déterminés comme illustré au §1. Le résultat final de ce processus itératif est qualifié d'enrichissement de la demande commerciale par l'un des constructeurs qui exploite cette démarche dont le résultat final est une prévision exprimée en Véhicules Complètement Définis (VCD). En respectant les contraintes techniques et commerciales datées, un VCD est une des combinaisons possibles de PAs représentatives de la totalité des EPAs. Un VCD n'a pas d'existence physique, mais il est le reflet de ce que pourrait être un produit fini réel fabriqué à une date donnée ; il peut être alors qualifié de produit virtuel. Par construction, un VCD respecte l'ensemble des contraintes techniques et commerciales. Cette propriété confère au VCD la même cohérence que celle des produits vendables. L'explosion classique des nomenclatures est alors réalisée au niveau des produits finis en utilisant les prédicats qui identifient les CAs constituant chaque VCD.

À chaque étape du processus d'enrichissement, la résolution consiste à choisir une solution particulière parmi l'infinité de solutions possibles. Pour que ce choix puisse se faire, il est nécessaire de définir un critère de sélection comme celui proposé au §2 consistant à minimiser un indicateur d'écart entre la solution recherchée, représentant les coefficients de prévision (variables de décision) portant sur des combinaisons de PAs, et les dernières valeurs observées. Pour poursuivre la logique de calcul des coefficients à un niveau de combinatoire plus élevé (impliquant par exemple trois EPAs), il faut constituer de nouveaux PAs plus agrégés, ainsi nous définissons un ensemble pouvant être qualifié de Méta-EPA. Les PAs d'un Méta-EPA résultent de la combinaison d'au moins deux PAs basiques appartenant à différents EPAs. Par exemple, les combinaisons $MO_i \wedge CL_j$ peuvent être vues comme des PAs du Méta-EPA (MOtorisation, CLimatisation).

Ce processus itératif consiste donc à enrichir progressivement, et sur chaque période de l'horizon de planification, la demande commerciale exprimée au niveau des EPAs. Les tableaux ci-dessous illustrent comment on procède au calcul de coefficients associés à des combinaisons de PAs issues des EPAs Motorisation, Climatisation et Région Commerciale, les combinaisons $MO_i \wedge CL_j$ interdites n'étant pas reprises dans le Méta-EPA combinant les EPAs motorisation et climatisation. Dans cet exemple, le calcul fait dans le [Tableau 12](#) (les coefficients de prévision relatifs aux combinaisons $MO_i \wedge CL_j$) est utilisé comme une donnée d'entrée pour calculer les coefficients de prévision de la combinaison $(MO_i \wedge CL_j) \wedge RC_k$.

Ci-dessous, le premier tableau fournit les coefficients initiaux ou historiques associés aux combinaisons autorisées $(MO_i \wedge CL_j) \wedge RC_k$. Le second tableau propose une des solutions possibles au calcul des coefficients de prévision des combinaisons $(MO_i \wedge CL_j) \wedge RC_k$. Cette solution respecte la structure des prévisions de l'EPA Région Commerciale et la structure des prévisions du Méta-EPA (MOtorisation, CLimatisation) obtenue au [Tableau 12](#). Puisque le système d'équation est encore sous-déterminé à cette étape du processus d'enrichissement, les valeurs de $P_1((MO_i \wedge CL_j) \wedge RC_k)$ sont obtenues grâce à un modèle d'optimisation qui minimise l'indicateur $\sum_j [P_1((MO_i \wedge CL_j) \wedge RC_k) - P_0((MO_i \wedge CL_j) \wedge RC_k)]^2$ sous les contraintes suivantes :

$$P_1(MO_1 \wedge CL_1 \wedge CR_1) + P_1(MO_1 \wedge CL_1 \wedge CR_2) = 0,027$$

$$P_1(MO_2 \wedge CL_1 \wedge CR_1) + P_1(MO_2 \wedge CL_1 \wedge CR_2) = 0,067$$

$$P_1(MO_3 \wedge CL_1 \wedge CR_1) + P_1(MO_3 \wedge CL_1 \wedge CR_2) = 0,107$$

$$P_1(MO_1 \wedge CL_2 \wedge CR_1) + P_1(MO_1 \wedge CL_2 \wedge CR_2) = 0,073$$

$$P_1(MO_2 \wedge CL_2 \wedge CR_1) + P_1(MO_2 \wedge CL_2 \wedge CR_2) = 0,103$$

$$P_1(MO_3 \wedge CL_2 \wedge CR_1) + P_1(MO_3 \wedge CL_2 \wedge CR_2) = 0,053$$

$$P_1(MO_4 \wedge CL_2 \wedge CR_1) + P_1(MO_4 \wedge CL_2 \wedge CR_2) = 0,043$$

$$P_1(MO_5 \wedge CL_2 \wedge CR_1) + P_1(MO_5 \wedge CL_2 \wedge CR_2) = 0,093$$

$$P_1(MO_6 \wedge CL_2 \wedge CR_1) + P_1(MO_6 \wedge CL_2 \wedge CR_2) = 0,083$$

$$P_1(MO_4 \wedge CL_3 \wedge CR_1) + P_1(MO_4 \wedge CL_3 \wedge CR_2) = 0,127$$

$$P_1(MO_5 \wedge CL_3 \wedge CR_1) + P_1(MO_5 \wedge CL_3 \wedge CR_2) = 0,107$$

$$P_1(MO_6 \wedge CL_3 \wedge CR_1) + P_1(MO_6 \wedge CL_3 \wedge CR_2) = 0,117$$

$$\begin{aligned} &P_1(MO_1 \wedge CL_1 \wedge CR_1) + P_1(MO_2 \wedge CL_1 \wedge CR_1) + P_1(MO_3 \wedge CL_1 \wedge CR_1) \\ &\quad + P_1(MO_1 \wedge CL_2 \wedge CR_1) + P_1(MO_2 \wedge CL_2 \wedge CR_1) + P_1(MO_3 \wedge CL_2 \wedge CR_1) \\ &\quad + P_1(MO_4 \wedge CL_2 \wedge CR_1) + P_1(MO_5 \wedge CL_2 \wedge CR_1) + P_1(MO_6 \wedge CL_2 \wedge CR_1) \\ &\quad + P_1(MO_4 \wedge CL_3 \wedge CR_1) + P_1(MO_5 \wedge CL_3 \wedge CR_1) + P_1(MO_6 \wedge CL_3 \wedge CR_1) = 0,550 \\ &P_1(MO_1 \wedge CL_1 \wedge CR_2) + P_1(MO_2 \wedge CL_1 \wedge CR_2) + P_1(MO_3 \wedge CL_1 \wedge CR_2) \\ &\quad + P_1(MO_1 \wedge CL_2 \wedge CR_2) + P_1(MO_2 \wedge CL_2 \wedge CR_2) + P_1(MO_3 \wedge CL_2 \wedge CR_2) \\ &\quad + P_1(MO_4 \wedge CL_2 \wedge CR_2) + P_1(MO_5 \wedge CL_2 \wedge CR_2) + P_1(MO_6 \wedge CL_2 \wedge CR_2) \\ &\quad + P_1(MO_4 \wedge CL_3 \wedge CR_2) + P_1(MO_5 \wedge CL_3 \wedge CR_2) + P_1(MO_6 \wedge CL_3 \wedge CR_2) = 0,450 \end{aligned}$$

Dans la suite de cette partie, nous parlerons de la « méthode d'optimisation » en faisant référence à ce modèle d'optimisation qui minimise l'indicateur d'écart entre les prévisions et les valeurs initiales.

Tableau 13 : Exemple numérique de détermination des coefficients de nomenclature associés à une combinaison de trois PAs appartenant respectivement aux EPA MOtorisation, CLimatisation et Région Commerciale

Coefficients initiaux $P_0(CL_i \wedge MO_j \wedge CR_k)$														
Meta-EPA (MOtorisation, CLimatisation)														
Région Commerciale	RC ₁	CL ₁	CL ₁	CL ₁	CL ₂	CL ₂	CL ₂	CL ₂	CL ₂	CL ₂	CL ₃	CL ₃	CL ₃	Meta-EPA [CS \wedge MO] _{Ensemble}
		MO ₁	MO ₂	MO ₃	MO ₁	MO ₂	MO ₃	MO ₄	MO ₅	MO ₆	MO ₄	MO ₅	MO ₆	
		(CL ₁ \wedge MO ₁)	(CL ₁ \wedge MO ₂)	(CL ₁ \wedge MO ₃)	(CL ₂ \wedge MO ₁)	(CL ₂ \wedge MO ₂)	(CL ₂ \wedge MO ₃)	(CL ₂ \wedge MO ₄)	(CL ₂ \wedge MO ₅)	(CL ₂ \wedge MO ₆)	(CL ₃ \wedge MO ₄)	(CL ₃ \wedge MO ₅)	(CL ₃ \wedge MO ₆)	
		0,020	0,050	0,070	0,090	0,080	0,060	0,010	0,015	0,060	0,070	0,005	0,070	
Région Commerciale	RC ₂	0,000	0,050	0,050	0,000	0,040	0,020	0,040	0,080	0,025	0,010	0,080	0,005	0,400
	RC _{Ensemble}	0,020	0,100	0,120	0,090	0,120	0,080	0,050	0,095	0,085	0,080	0,085	0,075	1,000

Valeurs prévisionnelles des coefficients $P_1(CL_i \wedge MO_j \wedge CR_k)$														
Meta-EPA (MOtorisation, CLimatisation)														
Région Commerciale	RC ₁	CL ₁	CL ₁	CL ₁	CL ₂	CL ₂	CL ₂	CL ₂	CL ₂	CL ₂	CL ₃	CL ₃	CL ₃	Meta-EPA [CS \wedge MO] _{Ensemble}
		MO ₁	MO ₂	MO ₃	MO ₁	MO ₂	MO ₃	MO ₄	MO ₅	MO ₆	MO ₄	MO ₅	MO ₆	
		(CL ₁ \wedge MO ₁)	(CL ₁ \wedge MO ₂)	(CL ₁ \wedge MO ₃)	(CL ₂ \wedge MO ₁)	(CL ₂ \wedge MO ₂)	(CL ₂ \wedge MO ₃)	(CL ₂ \wedge MO ₄)	(CL ₂ \wedge MO ₅)	(CL ₂ \wedge MO ₆)	(CL ₃ \wedge MO ₄)	(CL ₃ \wedge MO ₅)	(CL ₃ \wedge MO ₆)	
		0,027	0,000	0,000	0,073	0,000	0,000	0,000	0,017	0,083	0,127	0,107	0,117	
Région Commerciale	RC ₂	0,000	0,067	0,107	0,000	0,103	0,053	0,043	0,077	0,000	0,000	0,000	0,000	0,450
	RC _{Ensemble}	0,027	0,067	0,107	0,073	0,103	0,053	0,043	0,093	0,083	0,127	0,107	0,117	1,000
Structure prévue du Meta-EPA [CLimatisation \wedge MOtorisation] (coefficients obtenus à la dernière itération - cf. Tableau 6)														Structure prévue Régions Commerciale

L'existence de composants alternatifs déterminés par un grand nombre d'EPAs implique de nombreuses étapes dans l'enrichissement de la demande commerciale. Le cas extrême est celui d'un CA déterminé par l'ensemble des EPAs. En pratique, cette méthode aboutit donc à des prévisions dont le niveau de finesse atteint celui du véhicule fini, c'est-à-dire le niveau 0 de la nomenclature, privé de ses composants systématiques et de ceux utilisés en différenciation retardée. Sans aucun autre aménagement, le processus d'enrichissement qui vient d'être décrit serait difficile à mettre en œuvre dans la réalité car à la dernière étape d'enrichissement, le nombre de variables de décision atteindrait celui de la diversité des produits finis. Pour contourner ce problème, les PAs sont combinées par groupes d'EPAs fortement dépendants. La notion de dépendance entre EPAs renvoie à l'existence de contraintes techniques et/ou commerciales entre les PAs appartenant à ces ensembles (cf. Figure 21). Les Méta-EPAs ainsi constitués à partir d'EPAs interdépendants regroupent des combinaisons de PAs dont les coefficients sont calculés selon le mécanisme d'optimisation précédemment illustré. Par ces regroupements en Méta-EPAs, qui par construction présentent des liens de dépendance limités,

il devient possible de calculer des coefficients de nomenclature en combinant deux à deux les éléments appartenant à ces nouveaux ensembles. Les coefficients obtenus sont ensuite utilisés pour générer, sur chaque période de l'horizon de planification, des VCDs caractérisés sur l'ensemble des PAs et dont le nombre total est égal au volume de production périodique. Nous reviendrons par la suite sur le mécanisme qui permet de passer de coefficients de nomenclatures associés à des combinaisons de PAs à une population de VCD sur chaque période de l'horizon de planification.

Pour illustrer pas à pas le fonctionnement de cette approche, prenons l'exemple d'un modèle de véhicule configurable à partir des EPAs spécifiés dans la [Figure 20](#) (Région commerciale, Motorisation, Niveau d'équipement, Transmission, Côté de conduite, Jantes, Climatisation, Ordinateur de bord). Pour simplifier notre propos, on fera l'hypothèse d'une offre commerciale stable sur l'horizon de planification et d'une ligne de production dédiée uniquement à l'assemblage du seul modèle étudié.

Dans l'approche décrite dans cette section, la Direction Commerciale exprime sa demande sous la forme de prévisions au niveau des PAs de chaque EPA. Ces prévisions, supposées respecter la capacité industrielle disponible, sont exprimées pour un modèle donné en pourcentage de la production totale par période. Le processus d'enrichissement de cette demande peut alors se décrire en quatre étapes :

- Étape 1 : La première étape du processus d'enrichissement de la demande commerciale commence par la construction de plusieurs Méta-EPA comme illustré ci-dessous. On peut noter que dans cette construction arbitraire, les EPAs d'un même Méta-EPA sont dépendants et que les Méta-EPAs, pris deux à deux, sont indépendants sauf lorsqu'un des deux Méta-EPAs est celui constitué à partir des EPAs : Niveau d'équipement, Région Commerciale et Motorisation. Ce Méta-EPA particulier, qualifié de principal et repéré en bleu sur la [Figure 22](#), peut constituer une première base à partir de laquelle la demande commerciale sera enrichie en combinant ces éléments avec ceux des autres Méta-EPAs, en jaune sur la [Figure 22](#), qualifiés eux, de secondaires.

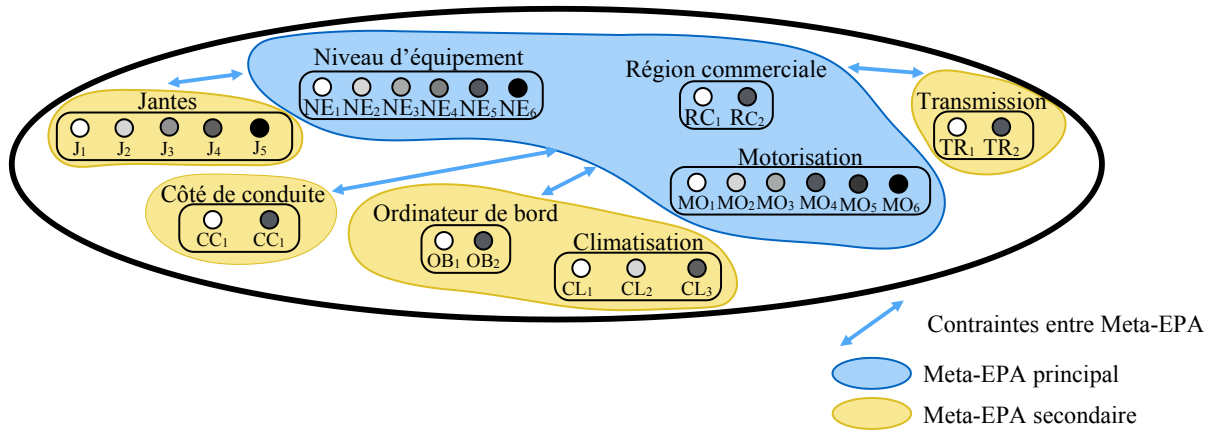


Figure 22 : Représentation des Méta-EPA

- Étape 2 : La deuxième étape du processus d'enrichissement de la demande commerciale consiste à appliquer au sein de chaque Méta-EPA le principe d'optimisation précédemment illustré pour obtenir des coefficients sur des combinaisons de PAs. Il faudra donc pour chaque période de l'horizon de planification, au sein de chaque Méta-EPA, appliquer ce principe autant de fois qu'il y a d'EPA moins 1, dans le Méta-EPA considéré. Les résultats de cette étape pourront être considérés comme les coefficients marginaux de Méta-PAs issues de la combinaison de PAs basiques. Les Méta-EPA constitués d'un seul EPA (comme les jantes, le côté de conduite ou la transmission) ne sont pas concernés par cette étape.
- Étape 3 : La troisième étape du processus consiste à trouver, selon le même principe d'optimisation présenté en début de section, les coefficients associés à la combinaison de deux PAs dont une d'elles appartient au Méta-EPA principal. Sur une période donnée, il s'agira de compléter indépendamment et dans un ordre quelconque un à un les Tableaux 14 ci-dessous où les coefficients marginaux sont le résultat de la deuxième étape du processus ; ces coefficients marginaux sont représentés par leur formule en caractères rouges dans les Tableaux 14.

troisième étape du processus ($P(\text{PA Secondaire} \wedge \text{PA Principal})$) sont transformés en probabilités conditionnelles par la relation : $P(\text{PA Secondaire} / \text{PA Principal}) = P(\text{PA Secondaire} \wedge \text{PA Principal}) / P(\text{PA Principal})$ où $P(\text{PA Principal})$ est calculé à l'étape 2. Ces probabilités conditionnelles sont utilisées pour choisir aléatoirement une Méta-PA dans chaque Méta-EPA secondaire. Quand un produit est complètement défini par l'ensemble des Méta-EPA secondaire, l'opération est répétée jusqu'à ce que le nombre de produits à fabriquer pour la période soit atteint. Les produits ainsi générés et enrichis sur l'ensemble des EPAs constituent le PDP au niveau 0 de la nomenclature. Les quantités du PDP au-delà de l'horizon gelé sont considérées comme certaines. Il devient alors assez simple, à partir de ces quantités, de réaliser des calculs de besoins en CAs par l'utilisation de prédicats.

Les 4 étapes du processus d'enrichissement peuvent être synthétisées d'une manière algorithmique comme ceci :

1. Constituer les Méta-EPAs (le Principal et les Secondaires)
2. Pour chaque période de l'horizon de planification
 - 2.1. Calculer les coefficients de prévision des combinaisons de PAs du Méta-EPA Principal
 - 2.2. Calculer les coefficients de prévision des combinaisons de PAs des Méta-EPAs Secondaires
 - 2.3. Pour chaque Méta-EPA Secondaire
 - 2.3.1. Pour chaque PA du Méta-EPA Secondaire sélectionné :
 - 2.3.1.1. Calculer le coefficient de prévision de la combinaison de cette PA avec une PA du Méta-EPA Principal
 - 2.3.1.2. Transformer le coefficient de prévision calculé en une probabilité conditionnelle en le divisant par le coefficient de prévision de la PA concernée du Méta-EPA Principal
 - 2.4. Pour chaque produit
 - 2.4.1. Sélectionner une PA du Méta-EPA Principal en fonction du coefficient calculé au 2.1
 - 2.4.2. Pour chaque Méta-EPA Secondaire, sélectionner une PA en fonction des probabilités conditionnelles calculées au 2.3.1.2

La détermination du PDP au niveau 0 de la nomenclature présente l'avantage, en respectant les propriétés de cohérence physique des VCDs, d'être « rassurante » pour les praticiens de la chaîne logistique. Son utilisation, à des fins de planification à moyen terme est perçue comme le simple prolongement de l'ordonnancement. Par construction, l'utilisation du VCD garantit des réquisitions de composants cohérentes entre elles au sens des contraintes techniques et commerciales. Si l'ordonnancement de la production au niveau des VCDs est indispensable sur le court terme, une démarche de planification en VCDs au-delà de l'horizon gelé donne l'illusion d'avoir à faire à une prévision certaine (identique à une commande client ferme) de la production à moyen terme.

En réalité, la recherche de la cohérence stricte, par le respect des contraintes techniques et commerciales ainsi que par une planification en VCDs, n'est pas sans conséquence sur la performance du pilotage de la chaîne logistique-amont. Les règles inhérentes au processus de déclinaison de la demande commerciale en VCDs peuvent être à l'origine de graves perturbations qui se propagent en cascade le long de la chaîne logistique amont à l'origine de l'effet coup de fouet en CL-amont (Childerhouse et *al.* 2008, et Niranjana et *al.* 2011).

L'analyse détaillée du processus de génération de VCDs utilisé par un grand constructeur automobile français, sommairement présenté dans cette section, a révélé l'existence de tels phénomènes (Sali 2012). Partant de nomenclatures de planification fournies par le commerce au niveau d'EPAs, la solution retenue par ce constructeur pour générer un PDP au niveau des produits finis fait appel à des méthodes de programmation mathématique pour résoudre en cascade une série de problèmes d'optimisation sur chaque période de planification. En propageant des erreurs à chaque itération, cette solution aboutit en pratique à des prévisions peu fiables conduisant à des ruptures de stocks impliquant des dépannages d'urgences très coûteux ou à des surstocks pesant sur la trésorerie des compagnies. La non-optimisation des stocks est aussi due à la re-génération des coefficients des PBOM par des approches de Monte-Carlo, à chaque itération du processus donc à chaque période.

Conclusion de la Partie II

Dans le contexte d'une personnalisation de masse, caractérisé par d'importantes restrictions dans la combinaison des nombreux composants alternatifs assurant cette diversité, la construction et l'usage des nomenclatures posent de redoutables problèmes méthodologiques. On a montré que l'explicitation de toutes les nomenclatures des produits susceptibles d'être fabriqués ne présentait pas d'intérêt en raison de la difficulté à retrouver la référence exacte d'un produit fini sans disposer préalablement de la liste des composants alternatifs qu'il comprend. Le respect de cette condition n'est pas possible dans l'expression par un client de ses besoins, à cause de la technicité requise et de l'existence de composants alternatifs qui lui sont cachés. La description d'un produit fini à partir d'une combinaison de prestations alternatives, correspondant à des caractéristiques fonctionnelles compréhensibles par le client et utilisables par la Direction Commerciale, constitue la seule alternative raisonnable à l'approche classique des nomenclatures. Cette nouvelle approche permet de créer la liste des composants alternatifs d'un produit fini à partir de prédicats utilisant les prestations alternatives retenues dans la définition du produit fini. Cette solution répond à l'ensemble des besoins opérationnels d'une entreprise. L'usage des EPAs pour établir le PDP au-delà de l'horizon gelé est incontournable car la Direction Commerciale exprime nécessairement ses prévisions en termes de prestations. Le passage des prévisions en termes de prestations à des prévisions en termes de composants ne peut se faire simplement dès lors qu'un CA est déterminé par plusieurs EPAs. Deux formulations possibles du PDP sont possibles et décrites : la première, utilisée par plusieurs entreprises, revient à définir le PDP au niveau 0 de la nomenclature, la seconde travaille sur une définition du PDP au niveau 1. Ces deux solutions présentent des faiblesses difficiles à contourner et l'analyse de leurs performances respectives mérite d'être creusée.

À la différence des nomenclatures génériques, en automobile les paramètres (c'est-à-dire les prestations alternatives) ne sont pas définis progressivement niveau par niveau. La démarche des constructeurs automobiles revient à proposer d'appliquer une nomenclature générique caractérisée par l'usage de prédicats à un seul niveau de nomenclature : les ECAs. La définition des CAs dans chaque ECAs se fait donc par le choix de prestations alternatives dans des EPAs, les PAs d'un EPA étant mutuellement exclusives.

Quelle que soit la solution retenue, l'accroissement de la diversité et l'allongement de la chaîne logistique ont un impact important sur la qualité des prévisions au-delà de l'horizon gelé. La dégradation de ces prévisions conduit la chaîne logistique à supporter des coûts additionnels

induits par les ruptures de stocks et les mesures prises pour tenter de les éviter. D'un point de vue stratégique il convient de s'interroger sur l'origine de ces deux évolutions décidées pour accroître la marge de l'entreprise, sans vraiment anticiper leurs impacts sur le coût du pilotage de la chaîne logistique. D'un côté, l'accroissement de la diversité résulte d'une pression de la Direction du Marketing qui postule que cette diversité, combinée à des modulations de prix, est attractive pour le client et plus rentable pour l'entreprise. D'un autre côté, l'étirement de la chaîne logistique est lié à une pression de la Direction du Contrôle de Gestion sur la Direction des Achats, pour baisser les coûts des approvisionnements.

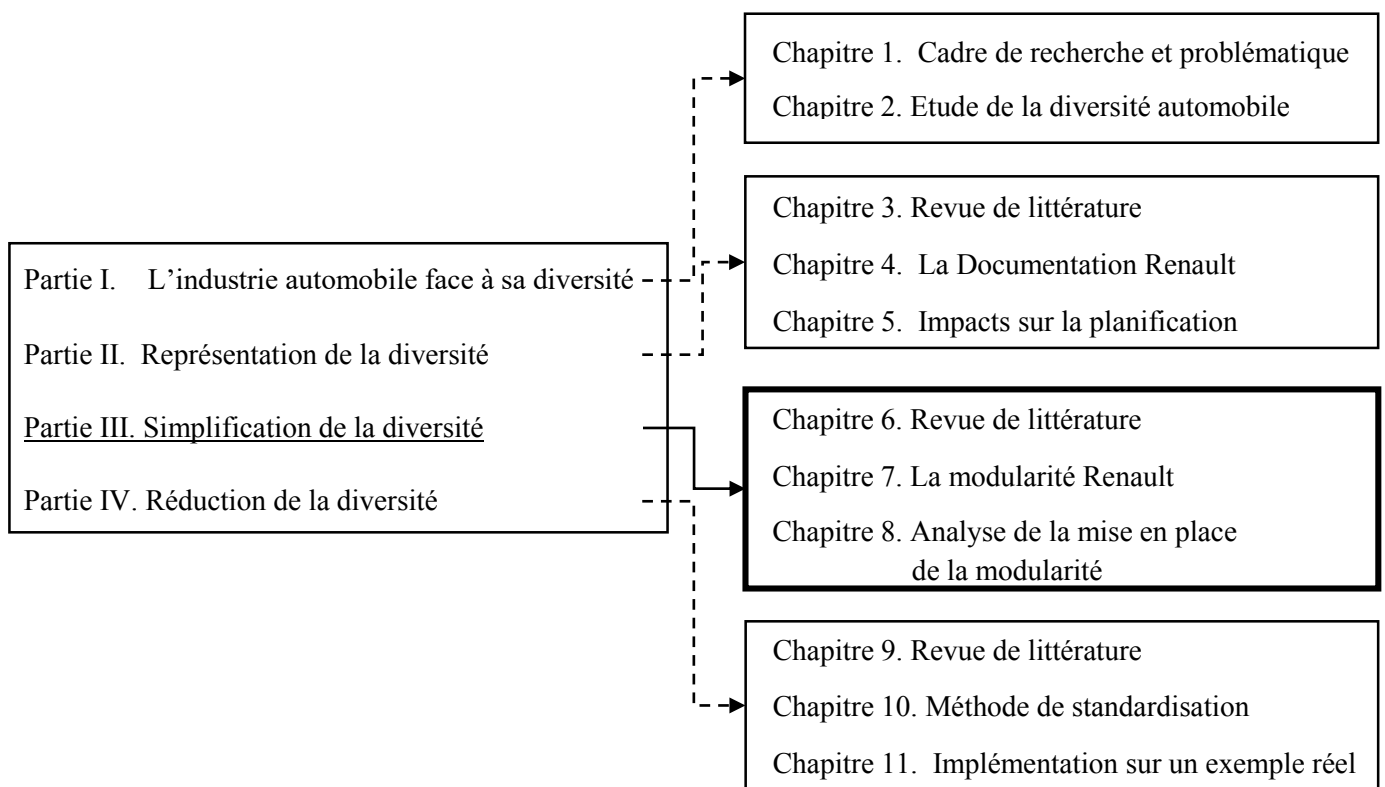
Cette vision stratégique de la diversité et de l'intérêt d'un approvisionnement mondial de composants alternatifs sur des considérations de coûts a longtemps été très largement partagée par les grandes entreprises du secteur automobile du monde entier. Depuis quelques années, on observe sur le marché européen une certaine prise de conscience des constructeurs automobiles des impacts négatifs d'une trop grande diversité. La diversité offerte aux clients se réduit par des logiques de packs (pas de climatisation automatique sans lecteur CD) ou de suréquipement (vitres arrières électriques de série, ordinateur de bord de série...). Ces tendances semblent en Europe principalement venir des constructeurs asiatiques et notamment coréens. La logique *low-cost* a aussi fait son apparition ces dernières années et moyennant une baisse des niveaux de prestations offertes aux clients, cette stratégie permet aussi de produire des véhicules moins diversifiés.

Ces trois dernières tendances ont toutes pour but de réduire la diversité de produits finis offerts aux clients, mais pas suffisamment pour que l'on ne puisse plus parler de production de masse fortement diversifiée. Au cours de ces dernières années, les constructeurs réticents à trop réduire la diversité de l'offre commerciale ont également lancé, par des moyens divers, des logiques de rationalisation de la diversité de composants (CAs) à iso-offre commerciale. La construction de produits modulaires en est sans doute le moyen le plus abouti. Par la standardisation des interfaces entre composants, la modularité peut réduire sensiblement le nombre de contraintes techniques à l'origine des problèmes rencontrés. Par ailleurs, la généralisation du partage de lignes d'assemblage par plusieurs modèles accélère aussi les conceptions de plateformes multi-modèles facilitant le partage de composants. Dans toutes ces réflexions de standardisation, le constructeur qui semble le plus avancé est, sans conteste, le groupe Volkswagen en passe de devenir le premier constructeur mondial.

En résumé, pour améliorer durablement leurs processus de planification dans un contexte de forte diversité, les entreprises disposent de leviers stratégiques qui ont trait à la conception des

produits et de la chaîne logistique amont. La rationalisation de la diversité, pour limiter les cas de détermination impliquant un grand nombre de prestations, suppose un effort de standardisation et de modularisation lors de la conception des produits et des composants qui le constituent. Pour pallier l'infaisabilité technique d'une modularité parfaite impliquant des interfaces complètement standardisées, le levier de conception de la chaîne logistique peut être mobilisé pour revenir à des approvisionnements de proximité impliquant des délais d'obtention inférieurs à l'horizon gelé pour les composants déterminés par plus d'un EPA.

Partie III. Simplification de la diversité : Architecture modulaire



Introduction de la partie III

La personnalisation de produits, pour être compatible avec la production de masse, se base nécessairement sur la combinaison de composants prés-conçus. De plus, pour répondre de manière plus précise à une diversité de besoins en termes de prestations et/ou de prix, les constructeurs automobiles ont développé des possibilités de choix de performance pour chaque composant en définissant des ensembles de composants alternatifs. Enfin, la complexité technique du produit automobile fait qu'il existe un grand nombre de contraintes à la combinaison de composants alternatifs. La réussite de la personnalisation de masse n'est donc possible que par la définition d'une *architecture de produits* permettant la combinaison de composants alternatifs et limitant le nombre de contraintes à leur libre combinaison. Cette démarche est donc éminemment une démarche de conception mais a des impacts dans toutes les phases du cycle de vie du produit.

L'architecture d'une famille de produits définit au niveau fonctionnel un découpage commun à l'ensemble des produits et spécifie des interfaces entre les systèmes qui répondront à ces fonctions. L'architecture qui répond le mieux au besoin de la personnalisation de masse en automobile semble être *l'architecture modulaire*. Cette approche est en rupture avec les architectures intégrées classiquement employées jusque-là. Elle se base sur une réflexion sur la gamme transversale aux produits dès les premières phases de développement et vise à rendre chaque fonction et chaque système y répondant indépendants des autres. Cette approche, nous le verrons en détail, fait la part belle à l'architecture système en amont des produits.

Dans cette partie, nous allons définir plus précisément la modularité. Nous chercherons dans un premier temps à en trouver le sens dans la littérature (Chapitre 6) puis chez Renault (Chapitre 7). La *conception modulaire* mise en place par Renault s'éloigne par certains aspects des approches évoquées dans la littérature. L'étude de ces écarts permet à la fois de nuancer les concepts de la littérature qui peuvent ne pas être applicables en entreprise et en même temps tirer des préconisations à la lumière des limites de la démarche adoptée pour Renault en particulier et pour l'industrie en général (chapitre 8).

Chapitre 6. Revue de littérature

La **modularité** est un concept au cœur de très nombreux travaux (plusieurs centaines) dans la littérature depuis sa première formalisation attribuée à Starr en 1965 (Salvador, 2007). Cette littérature témoigne de l'intérêt du concept à la fois pour les praticiens et les théoriciens de différents champs de recherche. En effet, la modularité est un concept important aussi bien en Gestion Industrielle (en anglais *Operations Management*) qu'en Conception (en anglais *Design Theory*) ou en Sciences des Organisations (en anglais *Management Science*).

Tous ces travaux ont en commun de se baser sur le concept de **modularité de produits**. Malheureusement, comme le souligne Salvador (2007) en faisant la liste de plus d'une centaine de définitions, il n'existe pas une et une seule définition normalisée de la modularité de produits (Piran *et al.* 2015, Starr 2010, Gershenson *et al.* 2004, Gershenson *et al.* 2003). Cela est essentiellement dû au fait que la définition des modules dépend de la stratégie voulue, c'est-à-dire des objectifs (Baldwin et Clark 2000, 1997, Pandremenos *et al.* 2009). Quelle que soit la stratégie, la modularité de produits est généralement introduite comme la solution à la définition d'une grande diversité de produits notamment pour les industries voulant entrer dans la personnalisation de masse (Pine 1993, Baldwin et Clark 2000, 1997, Sako et Murray 1996, Pandremenos *et al.* 2009, Helo *et al.* 2010, Jose Flores et Tollenaere 2005, Tu *et al.* 2004). La modularité de produits ne se définit d'ailleurs qu'au regard d'une diversité de produits généralement regroupés dans une famille. Salvador *et al.* (2002) proposent de définir **la famille de produits** comme « un ensemble de produits dont les demandes sont partiellement substituables, qui ont des fonctionnalités très proches et qui partagent une conception et un processus de production communs » (Krishnan et Gupta 2001, Meyer et Lehnerd 1997).

Dans cette thèse, nous nous intéressons aux produits physiques résultant d'un assemblage de composants. Ces produits sont des systèmes complexes (expression codifiée dans la littérature par PSCo¹⁰) qui pour rappel, sont caractérisés par un grand nombre de composants interdépendants. Cette définition du produit retire de notre étude toute la littérature portant sur la modularité des produits de services ou des produits virtuels comme les logiciels ou des produits non assemblés comme les produits chimiques¹¹. Nous pouvons alors définir un **composant** comme une portion distincte d'un produit qui répond à une fonction particulière et

¹⁰ Produit et Systèmes Complexe (par exemple : Catel et Monateri, 2007, Brusoni et Prencipe, 2001)

¹¹ La modularité utilisée dans cette littérature non pertinente pour notre question de recherche, n'est pourtant pas sans point commun avec la modularité que nous allons développer.

qui est lié aux autres composants par un ensemble d'interfaces. Un composant peut résulter d'un assemblage de plusieurs composants plus petits, on parlera alors de systèmes pour définir cet assemblé. Un **module** peut alors se définir comme un composant particulier résultant généralement d'un assemblage de composants (donc un système) qui possède des interfaces standards permettant de découpler ce module des autres (Salvador 2007, Ulrich 1995, Baldwin et Clark 2000, etc.).

La définition des modules lors du processus de conception est une activité qui relève de la définition d'architecture (Ulrich, 1995). La définition d'une architecture modulaire est alors un point clé dans la littérature sur la modularité de produits. En Sciences des Organisations, l'émergence d'architectures modulaires a fait ressortir la question du lien entre architecture de produits et architecture des organisations (Campagnolo et Camuffo, 2010). Cette discussion a aussi fait apparaître le concept de **modularité organisationnelle**. La modularité organisationnelle se définit comme un découpage des activités entre unités (qui peuvent être des membres, services, départements ou entreprises) qui repose pour un certain nombre d'auteurs sur le découpage en modules du produit. L'hypothèse généralement formulée est que la modularité de produit reposant sur des interfaces standards permet de simplifier les interactions (vues comme des échanges d'informations) dans l'organisation.

Le §1 nous permettra de voir en détail les nuances dans les définitions et les objectifs de la modularité de produits au cœur des travaux en Gestion Industrielle et en Conception. Nous développerons alors les notions de fonction et d'interface. En fait, la définition du découpage fonctionnel et de l'ensemble des interfaces est faite lors de la définition de l'architecture des produits.

Le §2 nous permettra alors de voir en détail la modularité organisationnelle au cœur des travaux en Sciences des Organisations. Certains travaux se focalisent sur l'organisation modulaire intra firme (cf. §2.1) tandis que d'autres s'intéressent davantage à l'organisation modulaire inter firme (cf. §2.2). Cette question nous semble intéressante dans le cadre de cette thèse car elle revêt un caractère stratégique dans la gestion de la diversité et dans l'organisation de la chaîne logistique.

1. La Modularité de produits

1.1. Différentes approches de modularité de produits

Le concept de modularité de produits recouvre différentes stratégies non exclusives entre elles. Dans la littérature, trois sont généralement décrites (Baldwin et Clark 2000, Sako et Murray 1996, Pandremenos *et al.* 2009, Salvador *et al.* 2002, etc.) :

- La **modularité en production**. Les modules sont optimisés selon un ou plusieurs critères de production. La modularité est alors vue comme un moyen pour faire de la différenciation retardée et atteindre une organisation en assemblage à la commande (en anglais *Assembly To Order, ATO*). Les modules peuvent être définis :
 - Soit en conception dans des démarches de conception pour l'assemblage_(en anglais *Design For Assembling*), pour les coûts de production (en anglais *Design For Costs*) ou pour la Logistique (en anglais *Design For Logistics*).
 - Soit après la conception par regroupement de composants déjà conçus. Cette démarche se base sur des outils mathématiques permettant de regrouper en modules un ensemble de différents types de composants définis à l'avance (Evans, 1963). Ici, la modularité ne vise pas à réduire les coûts de conception mais plutôt à améliorer la gestion de la production en se focalisant sur différents aspects comme la qualité, le temps de production ou le niveau des stocks. Le module est alors essentiellement un composant standardisé (Tarondeau, 1998) ou du moins aux interfaces standardisées (Starr, 1965). Cette approche qui se place après la conception des produits ne cherche pas à définir une architecture modulaire ou à concevoir des modules, elle vise à définir des assemblages de composants, des sous-systèmes permettant d'améliorer la gestion de la production. Cette littérature, proche de la standardisation, sera développée plus tard (Cf. Partie IV Chapitre 9 §2.1).
- La **modularité en conception**. Les modules sont optimisés selon un critère de conception visant à rendre indépendant les modules les uns des autres. Le but est alors souvent organisationnel car la modularité en conception vise souvent à réduire le temps et les coûts de conception. Ici, la modularité est une question traitée lors de la définition de l'architecture d'une diversité de produits (pouvant être une ou plusieurs famille(s)). Lors de la conception, les fonctions attendues sont connues et le but est ici de définir les fonctions à regrouper pour définir des modules (Erens et Verhulst 1997, Salvador 2007,

Ulrich 1995, Pandremenos 2009, Piran *et al.* 2015). Cette approche se base alors sur les matrices DSM (*Design Structure Matrix*, cf. Martin et Ishii 2002, Ericsson et Erixon 1999, Albano et Suh 1994, Huang et Kusiak 1998, Baldwin et Clark 2000) qui représentent le lien entre les fonctions techniques de produits et les paramètres décrivant les composants. L'architecture modulaire cherche à simplifier les interfaces et à définir des sous-systèmes indépendants qui se caractérisent par des matrices DSM diagonales par bloc. Ce courant est alors proche aussi de la littérature en Science des organisations visant à découpler les activités de conception. Ici, les modules sont généralement plus complexes (plus de composants assemblés).

- La **modularité d'usage**. La modularité d'usage correspond à une modularité particulière basée sur des variantes alternatives de modules. Elle vise à définir des modules en nombre limité mais possédant tous des interfaces standards identiques de telle sorte qu'il existe très peu de contraintes à la libre combinaison de ces modules. Les Lego en sont un exemple classique souvent utilisé. Salvador *et al.* (2002) parlent de *modularité combinatoire* (*combinatorial modularity*). Cette approche est largement utilisée depuis très longtemps, par exemple en mécanique (pignons, arbres, vis, boulons, horlogerie), en plomberie (tuyaux), en construction (rails, poutres, briques, parpaings, etc.), en ameublement (vis, pieds, plateaux, rails, etc.) ou encore en électronique (résistances, condensateurs, etc.). Cette approche permet de couvrir tous les besoins par une combinaison particulière de modules standards. Cette approche permet donc de répondre à des besoins d'usage futurs qui ne sont pas tous imaginés lors de la définition des modules. Ce type de modularité est intéressante car elle permet de proposer une diversité forte de produits avec peu de modules mais elle repose sur des modules nécessairement très standards et donc souvent peu complexes (souvent non assemblés). Par beaucoup d'aspects ce type de modularité semble proche du second point de la modularité de production.

1.2. Définition d'un module

Quelle que soit l'approche, nous pouvons définir de façon formelle un système comme un ensemble de sous-systèmes, c'est-à-dire de **modules** plus petits qui peuvent être gérés (conçus et/ou fabriqués et/ou vendus) de façon indépendante (Baldwin et Clark, 1997). Cette indépendance est obtenue par un découpage en amont (Baldwin et Clark, 1997, Ulrich, 1995) ad hoc du système (propre à chaque système et à chaque organisation) et à la définition

d'interfaces « découplées » (Ulrich, 1995) entre chaque module. Wilhelm (1997) insiste sur l'interchangeabilité du module et sur le fait qu'il peut être produit de façon indépendante.

En pratique, la définition par une entreprise des modules à utiliser est une activité très difficile (Ulrich et Eppinger 2000, Baldwin et Clark 1997, Fine 1998). Le choix des périmètres couverts par chaque module est stratégique puisqu'il fixe pour de nombreux acteurs des contraintes clés qui deviendront des données d'entrée. De plus, la définition d'un module se fait sur un horizon de temps important et pour toutes les familles de produits. Pour toutes ces raisons, la définition des périmètres des modules est stratégique.

1.2.1. Une approche d'abord fonctionnelle

Ulrich (1995) et Wilhelm (1997) précisent que pour avoir un découpage efficient, il est essentiel qu'un module réponde à, au plus, une seule fonction (une fonction pouvant être atteinte par la réunion de plusieurs modules). On peut définir un composant comme un sous-système séparable entrant dans la composition d'un système (Ulrich, 1995). Le composant ne sera alors module que s'il ne répond qu'à une seule fonction et que si ses interfaces sont découplées, c'est-à-dire indépendantes des autres composants. Les **fonctions** sont les opérations et les transformations individuelles qui contribuent à la performance globale d'un produit (Ulrich et Eppinger 2000, Eggen 2003). Les fonctions sont techniques ici (versus commerciales dans la Partie II Chapitre 4).

1.2.2. Complétée par la définition d'interfaces

Le découpage entre modules passe aussi par la définition d'interfaces standards (Starr 1965, Sanchez 1999, Agard 2002). On entend par **interfaces** toutes formes d'interactions entre deux composants (Chen et Liu 2005, Erens et Verhulst 1997, Agard 2002, Sanchez 1999, Ericsson et Erixon 1999). Les interfaces permettent donc de définir la compatibilité entre composants (Sanchez et Mahoney, 1996). Pour faciliter la définition exhaustive des interfaces, Sanchez dès 1994, en différencie 5 types :

- interfaces d'accouplement (comment les éléments se connectent)
- interfaces de transmission (comment l'énergie est transmise)
- interfaces de pilotage (comment le signal est transmis)
- interfaces géométriques (liées aux contraintes d'encombrement et de localisation)
- interfaces d'environnement (liées à d'autres influences : thermiques, magnétiques, etc.)

La standardisation des interfaces est un concept plus ancien que la modularité, on l'utilise par exemple depuis longtemps pour la mise en place à moindres coûts de réseaux sur mesure en électricité ou en plomberie. En fait, deux objectifs peuvent conduire une entreprise à standardiser les interfaces de ses composants (modules ou non) :

- À l'échelle de la gamme de produits pour réutiliser les modules développés avec un produit sur les autres (Ulrich, 1995). Cette approche visant à réduire la diversité est souvent proposée dans la littérature centrée sur la conception, puisqu'elle permet une réduction des temps de développement et des ressources nécessaires. Cette approche présente un risque de cannibalisation entre les produits si on standardise des modules visibles (Eggen, 2003). Cela peut aussi être une stratégie marketing d'entreprise comme c'est le cas, par exemple, pour le géant du meuble Ikea.
- À l'échelle du module pour créer facilement une diversité de niveau de performance. (Sanchez 1996, Sanchez 2002, Baldwin et Clark 1997, Pine 1993). Cette approche, visant à simplifier la gestion et la génération d'une grande diversité, est présente dans la littérature sur la production de masse de produits fortement diversifiés. C'est d'ailleurs dans cette optique que nous avons développé les méthodes d'optimisation du nombre de variantes dans le cadre de la standardisation.

La définition des interfaces très tôt dans un nouveau projet, ne permet pas souvent leur développement concret. La définition des interfaces est en fait la définition de spécification. C'est donc le choix de paramètres ad-hoc qui serviront de contraintes pour le développement simultané et indépendant des modules. La définition des interfaces est donc la définition de standards. Comme le soulignent tous les auteurs sur le sujet, cette définition réalisée en amont des développements, demande une très grande expertise du produit et une très bonne compréhension de leurs futures évolutions. Un standard doit être stable dans le temps pour être pleinement bénéfique. En effet, pour ne pas freiner l'innovation des produits, l'interface doit donc être pensée en tenant compte des besoins futurs (Erens et Verhulst 1997, Chen et Liu 2005, Eggen 2003, Ulrich 1995). La standardisation de l'interfaçage semble donc la pierre angulaire d'une bonne vision modulaire car elle permet de faciliter la substitution des variantes de modules et de raccourcir les temps de développement (Sanchez et Mahoney, 1996).

La définition d'un module donnée dans la partie précédente suppose qu'il regroupe un ensemble de composants. Cela induit donc qu'il existe à la fois des **interfaces internes** et des **interfaces externes** au module. En fonction du module et de son niveau d'assemblage (i.e. niveau de nomenclature si la nomenclature est arborescente), la stratégie que l'entreprise adopte doit être

différente (Chen et Liu, 2005). En effet, un sous-traitant qui fabrique un module (qui est son produit fini) va chercher à rendre standard ses interfaces externes pour le rendre utilisable par un maximum de clients alors qu'il va chercher à rendre opaques donc spécifiques, les interfaces internes pour éviter la copie. De son côté, le constructeur automobile fera la même chose mais avec un autre niveau de granularité. Déjà ici, on constate l'existence d'un point de discussion entre constructeurs et sous-traitants puisque la volonté de ne pas être copiés des premiers s'oppose à la volonté de proposer un produit standard et surtout d'éviter un composant « boîte noire » des seconds. La standardisation des interfaces externes des modules est essentielle pour l'interchangeabilité entre les variantes alternatives d'un module (Miller et Elgard, 1998). Dans une certaine mesure, il en est autant des interfaces internes qui permettent une rationalisation au plus juste de la diversité de chaque composant répondant à l'ensemble des variantes d'un module.

1.3. Architecture modulaire

1.3.1. Processus de conception

Comme le rappelle Mtopi Fotso (2006) dans sa thèse, le processus de conception généralement adopté par la communauté scientifique a été synthétisé par Pahl et Beitz (1996). Ils découpent le processus en quatre tâches génériques que la [Figure 23](#) décompose :

- Élaboration du cahier des charges,
- Formalisation et spécification des principes de solution,
- Conception d'ensemble,
- Conception détaillée.

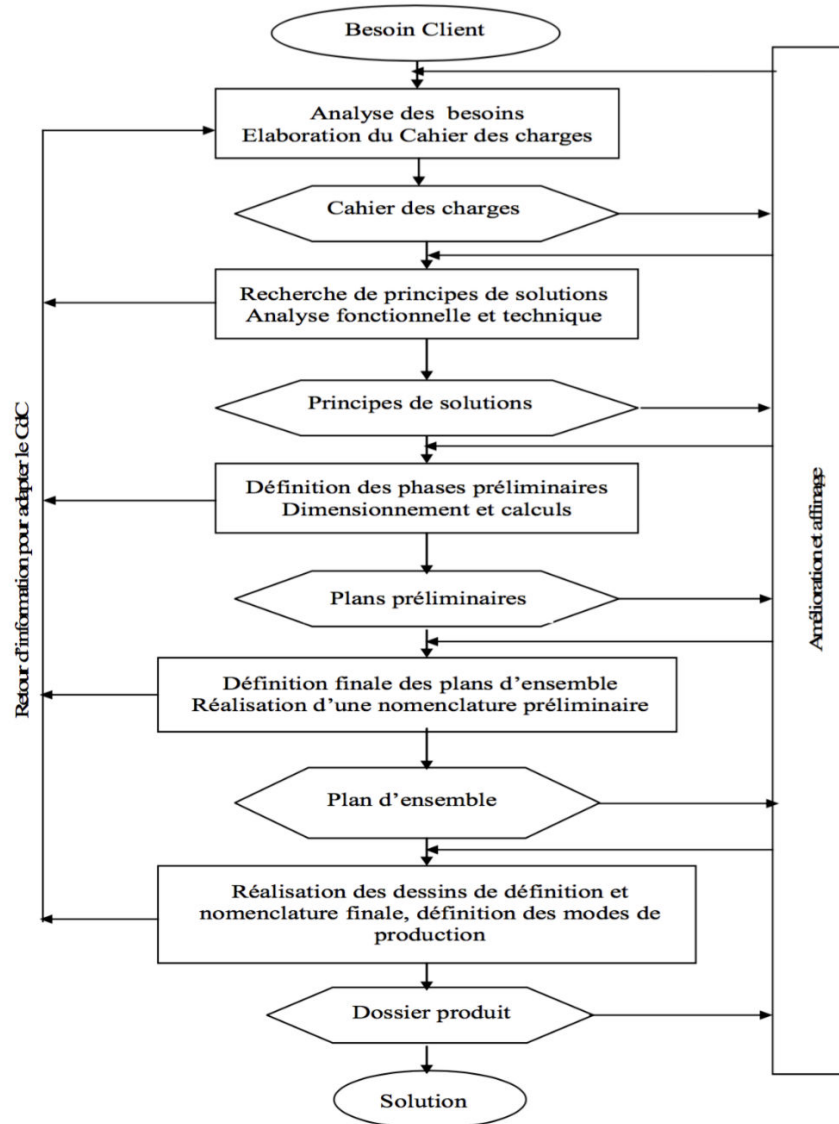


Figure 23 : Phases du processus de conception défini par Pahl et Beitz (1996) (extrait de Mtopi Fotso, 2006)

Historiquement séquentielles ces phases sont aujourd'hui exécutées simultanément et de façon intégrée (c'est-à-dire en lien étroit) pour limiter la propagation coûteuse des erreurs de définition et pour accélérer les temps de conception. Cela renvoie à la définition du concept d'ingénierie concourante (*concurrent engineering* en anglais) (Mtopi Fotso 2006). Albano et Suh (1994) ont développé un cadre de conception concourante basé sur un découpage en quatre vues du produit :

1. La vue des fonctions exprimées par le client.
2. La vue des fonctions techniques.
3. La vue physique.
4. La vue du processus (c'est-à-dire la production).

L'ordre de ces quatre vues est important et traduit les étapes du processus de conception. Dans chacune de ces vues, le produit peut être décrit par une liste arborescente d'items (fonctions ou composants ou opérations). Par l'adoption d'une démarche de conception concourante, les entreprises cherchent à concevoir (i.e. définir l'arborescence du général au particulier) simultanément les quatre vues. La précision dans une vue d'un item de niveau n par une liste d'items au niveau $n+1$, nécessite alors l'explicitation des items au niveau n dans la vue immédiatement suivante. Cela permet de tenir compte des contraintes des autres vues et donc de limiter les erreurs de conception source de coûts et de pertes de temps. La proposition des auteurs résulte donc dans un processus dit en « ZIG-ZAG » entre les différentes vues comme le montre la Figure 24.

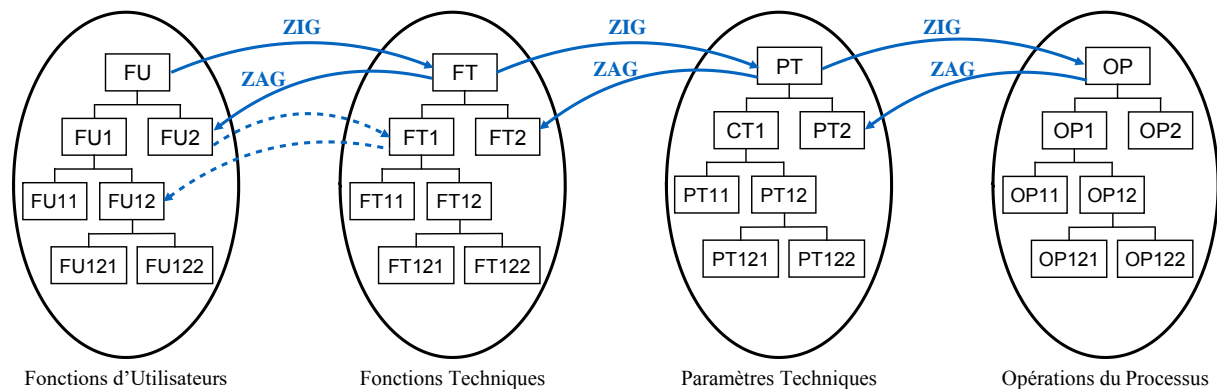


Figure 24 : Processus de conception en ingénierie concourante traduit d'Albano et Suh (1994)

Albano et Suh (1994) ont proposé une représentation matricielle des fonctions entre ces quatre espaces ($[FT]=A.[FU]$; $[PT]=B.[FT]$; $[OP]=C.[PT]$). Cette matrice est alors semblable aux matrices DSM (*Design structure matrix*) souvent évoquées dans la littérature (Martin et Ishii 2002, Ericsson et Erixon 1999, Huang et Kusiak 1998, Baldwin et Clark 2006). Les autres expliquent alors que l'indépendance entre modules définissable par un ou plusieurs items dans chaque groupe, passe par la diagonalisation par bloc de la matrice résultant du produit des trois matrices de transformation ($A.B.C$). La diagonalisation des matrices nécessite un compromis entre métiers. Cette discussion relève de la définition d'une architecture et a pour objectif de changer des paramètres définissant les modules (Baldwin et Clark 2006).

1.3.2. Architecture modulaire

1.3.2.1. Définition de l'architecture

Pour Erens et Verhulst (1997), l'architecture est à la fois la définition du découpage fonctionnel des périmètres de chaque module, la définition de leurs interfaces et le choix (impliquant des

démarches de standardisation) de certains critères techniques majeurs (i.e. des interfaces) tant de performance que de positionnement. Ulrich (1995) développe et définit l'architecture comme le schéma représentant :

- l'arrangement des fonctions élémentaires,
- la traduction de ces fonctions en composants physiques,
- la spécification des interfaces entre ces composants.

Cette définition semble largement acceptée aujourd'hui (Miller et Elgard 1998, Takeishi et Fujimoto 2001, Salvador 2007). Il ne fait aucun doute que la définition de l'architecture doit être la première étape de la mise en place de la conception modulaire (Ulrich 1995, Sanchez et Mahoney 1996). Cette activité doit donc intervenir dans les phases amont du développement de nouveaux produits (Dahmus *et al.* 2001, Chen et Liu 2005, Ulrich 1995, Baldwin et Clark 2000, Eggen 2003).

La définition de l'architecture est une activité stratégique au moins par le fait qu'elle fixe très en amont dans un projet un grand nombre de paramètres qui influenceront la capacité de l'entreprise à développer simplement (organisation, transfert d'information..), à produire à moindres coûts (flux, prévisions, gestion de la diversité), à réparer rapidement et à faire évoluer fréquemment (innovation) (Sanchez 2002, Dahmus *et al.* 2001, Chen et Liu 2005, Ulrich 1995, Baldwin et Clark 2000). L'architecture est établie après la définition du marché potentiel des tendances technologiques et l'identification de toutes les caractéristiques des produits dans la famille (Ulrich et Eppinger, 2000).

1.3.2.2. Définition de l'architecture modulaire

Un module se définit comme un sous-système enveloppe répondant à une fonction et dont les variantes sont substituables (ces variantes répondent à des niveaux de prestation ou des solutions techniques différentes), ce qui impose donc que ces interfaces soient standards. La modularité repose sur une stabilité à la fois du découpage fonctionnel et des interfaces externes. La définition des modules passe donc par la définition d'une **architecture modulaire** que Baldwin et Clark (1997) définissent comme des règles de conception (en anglais *Design rules*). Un composant n'est pas module en soi, un composant devient un module à partir du moment où il fait partie d'une architecture modulaire. À la lecture de l'article d'Ulrich (1995), il ne semble d'ailleurs pas évident pour lui qu'un module possède nécessairement plusieurs variantes. Un composant ne peut alors prétendre à être module qu'au regard d'une architecture, c'est-à-dire que lorsqu'ont été définies des interfaces standards et qu'il les respecte.

L'architecture modulaire s'oppose à l'architecture dite "intégrée" parce qu'elle n'autorise pas une relation surjective entre l'ensemble des fonctions élémentaires et l'ensemble des composants (à la différence d'un composant, un module répond à au plus une seule fonction). Mais il est faux de penser qu'un produit repose exclusivement soit sur une architecture modulaire soit sur une architecture intégrée (Ulrich, 1995). L'activité d'architecture revient donc à définir la frontière entre les composants qui seront développés dans une architecture modulaire de ceux qui seront développés dans une architecture intégrée (Ulrich, 1995, Chen et Liu, 2005, Ericsson et Erixon 1999). La définition de l'architecture est, pour employer les termes de Baldwin et Clark (1997, 2000), l'explicitation de ce qui constituera le « visible », c'est-à-dire l'ensemble des informations (standard, norme, choix de contraintes, etc.) connues de tous que sont les **règles de conception** et qui permettent à chaque équipe de développer indépendamment chaque module (Chen et Liu 2005, Sanchez 1996). En revanche, ils considèrent qu'à l'opposé, le développement de chaque composant ou module est la partie « invisible » de l'information. En disant cela, ils laissent penser qu'ensuite les modules sont alors eux développés avec une architecture intégrée, ce qui n'est pas forcément le cas (Eggen 2003, Chen et Liu 2005).

Ulrich a défini en 1995 trois types d'architecture modulaire :

- *Bus* : La plateforme inclut un élément support physique sur lequel se montent tous les modules. Les interfaces sont standards sur la gamme et communes à tous les modules. Cette approche est commune aujourd'hui en informatique personnel (carte mère et ses interfaces) voire dans l'industrie du meuble (Ikea) et reste a priori peu exploitable dans l'industrie automobile.



Figure 25: Schéma et exemple de l'architecture bus

- *Slot* : Identique au type bus sauf que les interfaces sont standards sur la gamme mais spécifiques à chaque type de modules. C'est en fait la vision classique en automobile de la plateforme comme support. Pour nous, cette vision tend à être dépassée par

l'approche modulaire dans laquelle des modules sont assemblés directement avec d'autres.



Figure 26: Schéma et exemple de l'architecture slot

- *Sectional* : Le support physique n'existe pas en tant que tel. Les modules s'assemblent les uns aux autres pour faire le système complexe. Les interfaces sont standards sur la gamme et généralement uniques par module. C'est l'architecture qui permet le plus de variété de produits (Jose Flores, 2005). C'est aussi l'architecture qui nous semble la plus générale et qui se développe le plus dans l'automobile avec l'approche modulaire (par exemple, la boîte de vitesses est interfacée avec le moteur qui lui est interfacé avec le châssis support).

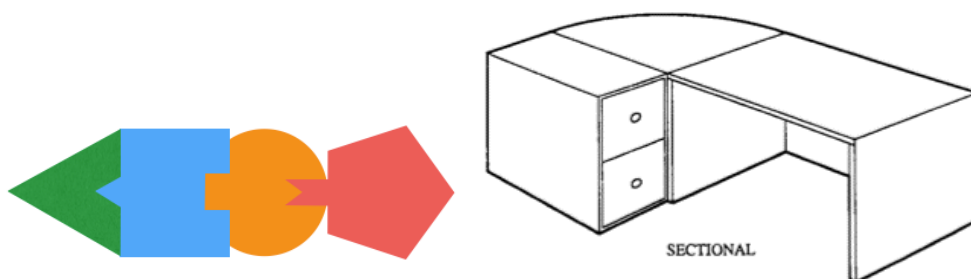


Figure 27: Schéma et exemple de l'architecture sectionnelle

Avec les types basés sur une plateforme, il semble plus facile d'atteindre l'indépendance entre modules, puisqu'ils semblent uniquement interfacés avec elle. Avec l'architecture sectionnelle, chaque module a en général des interfaces avec plusieurs autres modules et a donc en pratique plus de dépendance technique.

L'architecture modulaire idéale vise donc l'indépendance des modules entre eux. Cette indépendance permettrait de mettre en place des démarches de rationalisation au niveau de chaque ensemble de variantes de modules alternatifs. En pratique, cette indépendance peut être compliquée à atteindre et reste au mieux limitée aux cas d'applications anticipés (Ulrich, 1995).

L'indépendance entre modules n'est donc réelle que pour des plages d'utilisations ou de besoins bien définies. L'optimisation technico-économique s'opposant à l'indépendance absolue des modules, les entreprises à juste titre ne cherchent donc souvent pas à l'atteindre (Ulrich 1995, Eggen 2003). Toutes les boîtes de vitesses ne sont pas compatibles avec tous les moteurs d'une marque. La rationalisation de la diversité des modules doit donc en pratique tenir compte d'interdépendances entre modules.

1.3.2.3. La plateforme

Concept mis en place bien avant la conception modulaire, la **plateforme** est un objet complexe à appréhender et dont il manque dans la littérature une définition claire et acceptée de tous (Pandremenos *et al.* 2009). Cette difficulté vient principalement pour nous du fait que la plateforme revêt à la fois une dimension physique souvent associée au châssis et une dimension conceptuelle d'architecture (Ulrich 1995, Robertson et Ulrich 1998, Gonzalez-Zugasti 2000).

Dans l'industrie automobile où la notion de plateforme est largement utilisée, historiquement une plateforme était le moyen de répartir des investissements (productifs et de développement) sur différents véhicules et donc de profiter d'économies d'échelle. D'abord, en conception de produit, l'usage de plateformes se rapporte à l'utilisation d'un composant commun entre différents produits (Krishnan et Gupta 2001, Erens et Verhulst 1997, Sanderson et Uzumeri 1995, Mtopi Fotso 2006). Par exemple, lorsque Renault développe un nouveau véhicule, malgré la grande diversité que peuvent générer les choix de personnalisation du client final (rapidement supérieure aux 10 millions de véhicules différents), un nombre important de composants est invariable. Cette prise de conscience permet une première définition de la plateforme. En effet, la plateforme peut se définir comme l'ensemble ou un sous-ensemble des composants invariants dans une famille de produits et cela inclut les interfaces (Pandremenos *et al.* 2009, Chen et Liu 2005, Dahmus *et al.* 2001). La plateforme, une fois construite, représente donc l'architecture du produit ainsi qu'un certain nombre de composants stables.

La plateforme est donc la première approche de conception de produit permettant une diversification de l'offre qui aboutira aujourd'hui à la personnalisation de masse. En effet, la définition d'un élément stable commun à différents produits induit que les entreprises peuvent facilement proposer une diversité de produits en changeant quelques composants supplémentaires. Par l'addition de quelques composants de différenciation, les entreprises peuvent donc à la fois différencier un produit par rapport à un autre et optimiser leurs économies d'échelle (Meyer et Lehnerd 1997, Gonzalez-Zugasti 2000, Gonzalez-Zugasti *et al.* 2000, Sanderson et Uzumeri 1995, Sanderson 1991).

Plus récemment, les entreprises ont défini des plateformes multi-familles de produits. Cette approche permet à la fois d'adresser plus précisément une cible marketing par chaque famille de produits tout en profitant encore des effets d'échelle d'une plateforme commune à un grand nombre de produits finis. Si historiquement la plateforme définissait la famille de produits, on voit bien qu'aujourd'hui ce n'est plus le cas. Les produits d'une famille partagent aujourd'hui plus de composants que la seule plateforme qu'ils partagent avec des produits d'autres familles.

Au vu de notre lecture, il nous apparaît important de dire que les articles traitant de plateformes s'appuient sur des systèmes peu complexes (nombre de composants faibles/diversité faible comme les visseuses) ou sur des systèmes complexes (informatique, automobiles) mais gérés en un petit nombre (une dizaine) de sous-systèmes (modules).

Le concept de module dépasse la notion de plateforme et même celle de famille de produits. Avec l'approche modulaire, la plateforme peut alors apparaître à l'échelle d'une famille de produits donnée comme un ensemble de modules sans diversité et à l'échelle de la gamme de produits comme un seul module (la réunion de modules interfacés pouvant toujours être vue comme un module) avec des variantes. Le concept de famille se définit alors autour d'une diversité finie de variantes interchangeables pour les autres modules alternatifs (Dahmus *et al.*, 2001). Remarquons tout de même que la plateforme, entendue comme la réunion des composants sans diversité pour une famille de produits, peut potentiellement répondre à plusieurs fonctions, ce qui s'éloigne de la définition d'un module. On peut sans doute plus facilement s'y raccrocher si le module « plateforme » ne regroupe qu'une partie de ces composants stables, c'est d'ailleurs en pratique le cas vu leur grand nombre.

1.3.3. Avantages et inconvénients de l'architecture modulaire

L'intérêt d'une architecture modulaire est multiple dans la littérature.

- Elle permet l'obtention d'une grande variété de produits. L'utilisation de la substitution de variantes de modules ou de composants peut atteindre des millions de configuration (Tu *et al.* 2004, Sanchez et Mahoney 1996, Sanchez 1999, 1996, Miller et Elgard 1998, Ethiraj et Levinthal 2004, Mikkola et Gassmann 2003, Baldwin et Clark 2006). Les modules permettent, à partir d'une variété faible et stable de composants, d'offrir une très grande variété de produits finis. Douze modules à dix variantes indépendantes conduisent à mille milliards de combinaisons, c'est-à-dire de produits finis différents (10^{12}). Il est donc possible d'offrir une diversité gigantesque de produits avec 120 références de modules alternatifs à gérer.

- La modularité facilite la réutilisation d'un composant conçu pour un produit pour en concevoir un autre (Ulrich, 1995).
- Elle diminue les risques de généralisation d'une erreur par propagation (Jose Flores, 2005). Les modules isolés par leurs interfaces standards peuvent être vérifiés de façon indépendante, ce qui facilite le diagnostic et le contrôle de qualité dans la conception des produits.
- Le découpage en modules indépendants permet un développement en parallèle diminuant les temps de conception (Ulrich 1995, Sanchez et Mahoney 1996, Catel et Monateri 2007, Sanchez et Collins 2001). La définition à l'avance des interfaces permet de réduire les temps de développement et donc des coûts et améliore le temps de mise sur le marché (en anglais *time to market*) et la couverture des segments de marché par la gamme.
- La modularité permet donc de réaliser des économies d'échelle au niveau de la conception car l'utilisation de modules communs conduit à partager les coûts fixes de conception entre produits (Mikkola 2003, Ulrich 1995, etc.).
- La modularité permet aussi de réaliser des économies d'échelle en production car les produits se différencient par des variantes de modules aux interfaces standards. On utilise donc une moindre variété d'outillage et de machines et les coûts fixes de production sont partagés par plus de produits. Enfin le nombre de références communes aux produits étant amélioré, la modularité permet de réduire les coûts de stockage (Jose Flores 2005, Feng et Zhang 2014).
- Le découpage en modules indépendants permet des modifications plus fréquentes et à moindres coûts du produit (Ramachandran et Krishnan 2008, Baldwin et Clark 1997, Dahmus 2001, etc.). Cela facilite les économies de substitution pour remplacer un composant par un autre moins coûteux (Ramachandran et Krishnan, 2008, Jose Flores 2005).
- La modularité apporte aussi un formidable levier d'animation de l'innovation (Baldwin et Clark 1997, Dahmus et al 2001, Pine 1993, Cabigiosu *et al.* 2013, Chen et Liu 2005, Ethiraj *et al.* 2008, Pil et Cohen 2006). En effet, Baldwin et Clark (1997) expliquent que la standardisation par l'architecte (assembleur comme IBM, ou non comme APPLE) de des interfaces permet de mettre en concurrence plusieurs équipes (appartenant ou non à la même entité juridique) pour le module.
- L'architecture modulaire facilite le test des fonctionnalités de chaque module (Loch *et al.* 2001).

- Les modules améliorent le pouvoir de négociation des prix auprès des fournisseurs (Sanchez 1996, Agrawal 2009, Salvador *et al.* 2002). La standardisation des interfaces permet dans une certaine mesure de mettre en compétition plus de sous-traitants pour fabriquer les différents modules.
- La modularité de produit permet un assemblage de produits plus rapide. En effet, si les modules sont des groupes de composants, ils sont moins nombreux et donc si les interfaces sont bien conçues, l'assemblage est plus court (Jose Flores 2005, Catel et Monateri 2007).
- La modularité permet de mettre en place des politiques de différenciation retardée plus poussées allant jusqu'à l'assemblage à la commande (*ATO*) (Agard 2002, Jose Flores 2005). Le raccourcissement de la chaîne de montage final permet de raccourcir les délais de livraison (Jose Flores 2005, Catel et Monateri 2007).

L'architecture modulaire a aussi des inconvénients décrits dans la littérature.

- L'architecture modulaire est conservatrice. Une fois les interfaces définies, il est difficile de les modifier sans perdre l'intérêt de l'architecture. (Ulrich, 1995).
- La réutilisation de modules dans différents produits/familles de produits peut rendre l'offre commerciale très proche (Jose Flores, 2005). Par exemple, deux familles de véhicules logiquement positionnées différemment dans la gamme (notamment en termes de tarif) mais partageant un grand nombre de modules communs peuvent apparaître très proches pour les clients. La modularité peut donc induire des phénomènes de cannibalisation entre familles de produits.
- L'optimisation de la performance économique dans une approche modulaire inter-familles (respectivement inter-produits) peut nuire à la performance individuelle de chaque famille de produits (respectivement chaque produit) (Jose Flores, 2005).
- Pour définir une architecture modulaire, il faut plus d'expertise et plus de coopération, et donc plus de personnes et de temps parce qu'elle considère simultanément la conception de plusieurs produits différents (Sanchez et Collins, 2001). Elle s'oppose donc parfois à des logiques de retour sur investissement rapide (Ramachandran et Krishnan, 2008).
- Les caractéristiques des interfaces propres à certains produits limitent le nombre de combinaisons possibles entre modules (Frigant 2007, Brusoni et Prencipe 2001). Les modules alternatifs sont donc substituables mais généralement jusqu'à un certain point (Ulrich, 1995).

- Le coût de la fabrication de l'assemblage des différents modules (en dehors de la ligne d'assemblage final) peut augmenter avec la modularité en production (Song et Kusiak, 2010).
- La production de module caractérisée par des interfaces standards peut permettre à des concurrents de développer plus facilement des copies ou des modules de substitution. L'architecture modulaire peut donc réduire les barrières à l'entrée d'un marché comme celui de l'après-vente (Ethiraj *et al.* 2008, Frigant 2007).

Il est important à ce stade de préciser que, comme le souligne Frigant (2007), la modularité n'est pas identique dans tous les secteurs souvent utilisés pour illustrer le concept. Pour lui comme pour d'autres (par exemple Brusoni et Prencipe, 2001), les formes de modularité en informatique et en automobile ne sont pas identiques. Pour ces chercheurs, l'automobile est un produit ou un système complexe (PSCo) qui ne répond pas pleinement à la définition d'un module donnée par Ulrich (1995). En effet, ils montrent que les modules ne sont pas indépendants et même qu'un module n'est pas généralement lié à une seule fonction. À l'inverse, la modularité en informatique certes plus mature car plus ancienne, est prise comme l'exemple d'une architecture modulaire « pure » (c'est-à-dire parfaite).

2. La modularité de produits et la modularité organisationnelle

Pour certains auteurs, la modularité de produits permet une **modularité organisationnelle** (Catel et Monateri 2007, Sako et Murray 1999, Galvin et Morkel 2001, Frigant et Talbot 2004, Sanchez et Mahoney 1996). Par exemple en conception, « l'idée à la base de la modularité organisationnelle est que la standardisation des interfaces dans une architecture modulaire du produit contient en soi une forme de coordination qui réduit drastiquement les besoins d'échanges et d'instances de décisions dans un processus de développement » (traduit librement de Sanchez et Mahoney 1996). Pourtant, le caractère systématique de ce lien reste une discussion ouverte (Campagnolo et Camuffo, 2010). En effet, un certain nombre de travaux, en nombre plus restreints mais souvent empiriques, montrent que la modularité de produits n'aboutit pas systématiquement à une modularité organisationnelle (Brusoni et Prencipe 2001, Langlois 2002, Sosa *et al.* 2004). Sans trancher dans cette thèse cette question, la modularité organisationnelle nous semble être un des facteurs clés du succès des démarches de modularisation en entreprise. En effet, c'est bien souvent l'association d'une modularité de produits et d'une modularité organisationnelle qui conduit aux avantages que nous avons listés précédemment (cf. §1.3.2.2).

Les articles dans le domaine des Sciences des Organisations s'intéressent :

- Soit à **l'organisation modulaire intra-firme**, c'est à dire des services des entreprises développant des familles de produits ayant une architecture modulaire. Ces articles se focalisent sur les conséquences en termes de qualité de coûts et de délais (QCD) sur la gestion des processus internes. Ces processus peuvent être :
 - Soit ceux de conception au sein de la Direction de la R&D
 - Soit ceux de production au sein de la Direction de la Production
- Soit à **l'organisation modulaire inter-firme**, c'est-à-dire au sein de la chaîne logistique. Ces articles se focalisent sur la performance des chaînes logistiques (Feng et Zhang 2013, Nepal *et al.* 2012) ou sur l'évolution des rapports de force entre deux firmes dans une stratégie de modularisation des produits (Sako 1999, Hoetker *et al.* 2007, Davies et Joglekar 2013, Frigant et Lung 2002, etc.). Ces rapports peuvent être :
 - Soit verticaux dans une relation Donneur d'Ordres (DO) – Sous-Traitant (ST)
 - Soit horizontaux dans une relation concurrentielle ou partenariale

Comme l'ont très bien listée Baldwin et Clark (2006), la modularité organisationnelle permet :

- De rendre gérable une forte complexité de produits. Pour rappel, nous avons défini la complexité par la combinaison de très nombreux composants interdépendants.
- De permettre le travail en parallèle d'équipes spécialisées par fonction/module tant en conception qu'en production.
- De rendre l'organisation suffisamment flexible pour pouvoir s'adapter aux demandes futures qui sont de plus en plus imprévisibles.

2.1. Organisation modulaire intra-firme

À notre connaissance, aucune définition claire de la modularité organisationnelle n'a été proposée dans la littérature, nous en proposons alors une qui s'inspire largement de toute la littérature autour de ce concept. La modularité organisationnelle peut se définir comme le découpage en groupes indépendants et autonomes des moyens (humains et matériels) nécessaires à un processus. Chaque groupe est en charge d'un lot précis d'activités du processus. Le processus peut être un flux de conception ou un flux de production. La particularité de l'organisation modulaire réside dans l'indépendance et l'autonomie des groupes. La modularité organisationnelle repose sur la définition de l'architecture des produits qui permet l'indépendance et l'autonomie des groupes. En effet, la modularité de produits, en définissant des interfaces standards, offre la possibilité de séparer les activités de conception

et/ou de production propres à chacun des modules. **La modularité organisationnelle aboutit à définir des groupes autonomes qui sont chacun en charge de la production ou de la conception d'un module particulier.**

2.1.1. Organisation modulaire du processus de conception

L'organisation modulaire du processus de conception permet de raccourcir le développement d'une famille de produits et de limiter à la fois les échanges entre groupes dédiés aux modules et le besoin d'instance de décision pour coordonner les équipes (cf. [Figure 28](#)). Elle repose sur le découpage en modules indépendants. Si l'indépendance n'est pas atteinte, il faut alors bien faire attention aux interactions entre groupes de conception. L'équipe en charge de la définition de l'architecture doit être multidisciplinaire car une erreur dans la définition de l'architecture peut avoir de lourde conséquence. En plus des architectes qui travaillent en amont de la conception des modules, il faut des équipes d'architectes « locaux » pour valider l'intégration de chaque module dans son environnement (i.e. avec les modules aux interfaces) (Catel et Monateri, 2007).

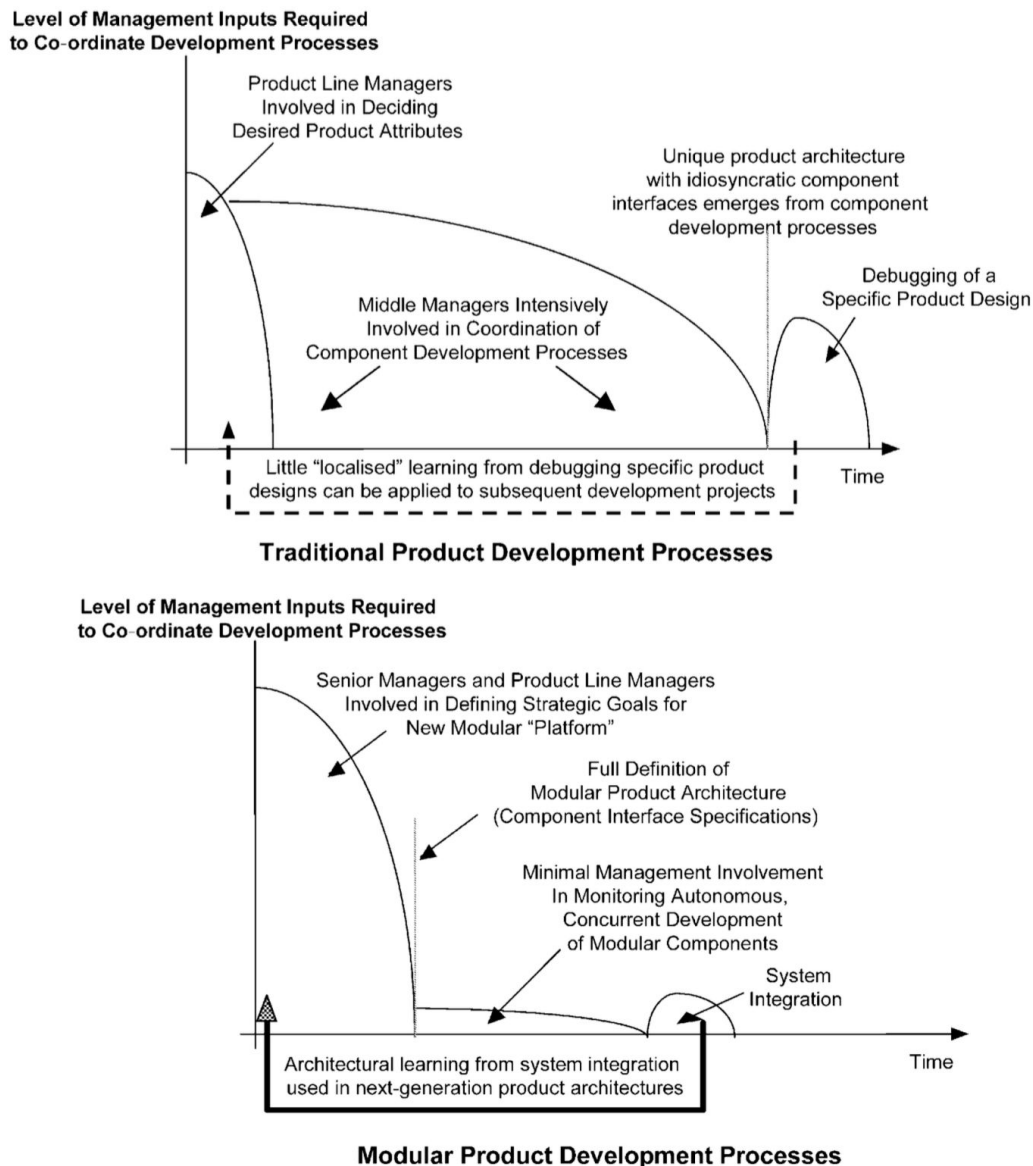


Figure 28 : Impact de la modularité dans la charge des équipes de conception (extrait de Sanchez et Collins 2001)

L'équipe en charge d'un module est animée par un leader et pour être autonome, les compétences de ses membres doivent être diverses (mécanique, électronique, logiciels, acoustique, etc.) (Catel et Monateri, 2007). Dans une organisation classique, les équipes de conception sont réparties par métier et donc par spécialité. Avec l'organisation modulaire, les groupes dédiés à chaque module rassemblent des membres appartenant à des métiers et donc à des services différents (Catel et Monateri, 2007). Le développement de chaque module est donc organisé comme un projet indépendant. Les membres de l'équipe en charge d'un module ne sont pas nécessairement détachés de leur direction métiers. Les équipes en charge de la conception des modules peuvent faire appel à une structure fonctionnelle aboutissant à une structuration fonctionnelle. Ce choix, bien connu en management de projet (Giard 2003), traduit

des objectifs différents de la part de la Direction. D'un côté, le maintien d'une structure purement fonctionnelle permet de continuer une mutualisation du savoir dans chaque métier auquel les membres restent hiérarchiquement rattachés. De l'autre côté, le plateau projet par module permet d'accélérer les échanges et généralement de permettre une meilleure optimisation.

2.1.2. Organisation modulaire de la production

De façon chronologique, la modularité de produits a d'abord été un concept de production (Baldwin et Clark 1997, Starr 1965) : le module étant alors un sous-ensemble d'un produit permettant de désynchroniser la production des sous-systèmes et l'assemblage final des produits (Baldwin et Clark 2000, Sako et Murray 1999). La modularité de l'organisation de la production permet de développer des approches de différenciation retardée et d'assemblage à la commande permettant de minimiser les stocks de produits finis. L'organisation modulaire de la production permet aussi de simplifier la gestion de la diversité de composants dans l'usine, cela est d'ailleurs l'un des premiers arguments pour les fabricants automobiles (Catel et Monateri 2007, Langlois 2002, Sanchez et Mahoney 1996, Baldwin et Clark 2000, Ulrich 1995) qui ont pu réduire la longueur des lignes d'assemblage final. La production des modules se fait sur une ligne complémentaire. Cette ligne peut être synchronisée avec la ligne d'assemblage final, elle alimente alors en flux tendu la station qui montera ces modules. Cette ligne peut aussi être désynchronisée, c'est donc une ligne parallèle qui alimentera alors un stock.

2.2. Organisation modulaire inter-firmes

Les mutations organisationnelles internes des entreprises mettant en place des architectures modulaires des produits ont des conséquences sur l'écosystème de ces firmes. Les changements d'organisation au sein de la firme conduisent aujourd'hui à une remise en question des activités qu'elle doit encore maintenir en interne. Ce changement de répartition conduit à la fois à un changement dans la nature des échanges entre Donneur d'Ordres (DO) et Sous-Traitant (ST) (§2.2.1) mais aussi dans la nature des stratégies des ST vis-à-vis de leur concurrents (§2.2.2).

2.2.1. Relations verticales inter-firmes

La modularisation de l'organisation d'un donneur d'ordres entendue comme la segmentation ou le morcèlement de ses processus en activités relativement indépendantes permet comme la Taylorisation en son temps, une désintégration possible de ses processus (Catel et Monateri 2007). Dans beaucoup de secteurs à l'instar de l'automobile, l'externalisation de la production n'est pas un sujet nouveau (80% des références assemblées pour fabriquer un véhicule sont

achetées). L'architecture modulaire des produits conduisant à la modularisation des organisations permet de franchir une nouvelle étape dans le transfert d'activités entre donneurs d'ordres et sous-traitants. En effet, l'architecture modulaire offre la possibilité de réduire le nombre de fournisseurs et de composants achetés et donc la longueur des lignes de production et le temps de production (Frigant 2007 et 2013, Catel et Monateri 2007)¹². Les composants sont alors des sous-systèmes résultant d'un assemblage et non plus des composants élémentaires, ils sont donc de plus en plus complexes (Frigant 2007, MacDuffie et Helper, 2006). Ces transferts d'activités conduisent alors potentiellement à un déplacement de la firme pivot dans la chaîne logistique (Camuffo 2000, Mikkola 2003, Ciravegna *et al.* 2013, Lau *et al.* 2010, MacDuffie et Helper 2006, Hoetker *et al.* 2007, Catel et Monateri 2007, Frigant 2007).

L'externalisation ne concerne pas seulement les processus de production mais aussi les processus de conception. Le découpage des produits en modules avec des interfaces clairement définies facilite la conception en parallèle de chaque système. Les auteurs observent qu'à maturité, il y a progressivement un transfert des métiers de développement aux fournisseurs historiquement seulement fabricants de ces sous-systèmes. Certains grands groupes de l'industrie automobile ont initié cette démarche (Baldwin et Clark 1997, Dahmus *et al.* 2001, Frigant 2007, Pandremenos *et al.* 2009) mais avant eux, d'autres secteurs l'avaient fait comme celui du vélo (Galvin et Morkel 2001) ou de l'informatique (Baldwin et Clark 1997, Sako et Murray 1999).

Bien que la modularisation des processus d'une firme rend possible et plus facile l'externalisation de ces activités, la modularité organisationnelle ne peut pas être définie comme une cause de la désintégration des entreprises. Comme le soulignent Catel et Monateri (2007), la modularité organisationnelle doit plutôt être vue comme un moyen permettant une externalisation d'activités. Les causes de cette désintégration verticale des processus est alors davantage la conséquence à la fois d'une pression toujours plus forte sur la rentabilité des

¹² D'après une étude faite par Catel et Monateri (2007) de différents travaux que nous n'avons pas pu récupérer (Chung 2002, Fredriksson 2006) il semble que Volvo assemblait 23 modules sur la ligne d'assemblage final pour obtenir un véhicule, que 17 de ces modules étaient fabriqués sur des lignes déportées dans l'usine alors que le reste est acheté. Hyundai semble avoir décomposé un véhicule en 12 modules (cockpit, portières, package arrière, suspension avant, suspension arrière, réservoir, système de refroidissement, pare-chocs arrière, pare-chocs avant, pot d'échappement, pédalier, toiture), lui permettant de réduire de 50% la taille de la ligne d'assemblage final et de 30% le temps d'assemblage.

entreprises et d'une exigence très haute des marchés tant en termes de diversité de produits que de renouvellement des gammes ou que de délai de livraison (Frigant 2007, Campagnolo et Camuffo, 2010). Pour les firmes DOs qui deviennent architectes, l'externalisation des activités permet de réduire leur exposition au risque en réduisant les investissements (tant en R&D qu'en moyens de production) et la modularité permet justement de réduire les coûts de recours au marché (Frigant, 2007).

La modularisation des organisations inter-firmes conduit à une complexification des sous-systèmes fabriqués par un sous-traitant. Les sous-traitants acceptent volontiers ce type de transferts puisqu'il leur donne une formidable opportunité de création de valeurs (Catel et Monateri 2007, Sako et Murray 1999). Cette création de valeur s'associe à une pression sur les coûts d'achats de la part des donneurs d'ordres et qui conduit les sous-traitants à standardiser les composants constituant les modules. Les sous-traitants cherchent donc à réduire la diversité de composants que Chen et Liu (2005) appellent diversité « interne » et que Baldwin et Clark (2000) appellent diversité « invisible » (au sens non défini par l'architecte, le DO). Mais la prise en charge de systèmes plus complexes par un ST induit le besoin de nouvelles compétences (Catel et Monateri, 2007) que ça soit :

- Pour produire ces modules :
 - Fabriquant des modules plus complexes, il va sans doute devoir maîtriser de nouvelles techniques, acquérir de nouvelles machines.
 - La complexification des systèmes qu'il produit conduit à des problématiques de gestion nouvelles (systèmes d'information, nomenclatures des produits, gestion de la production, etc.). En effet, la complexification des modules à produire implique une diversification de sa production. Prenons le cas simple d'une usine qui produisait 3 composants élémentaires ayant chacun 3 variantes, l'usine produisait donc 9 références différentes ; si ces composants sont indépendants mais obligatoires, l'usine produit alors maintenant un seul module avec 27 ($=3 \times 3 \times 3$) variantes.
 - Le sous-traitant doit généralement acheter de nouveaux composants dont il n'a a priori pas une très bonne connaissance, il faut donc qu'il développe aussi de nouvelles compétences au niveau de sa Direction des Achats.
- Pour concevoir ces modules :
 - Il devra développer des connaissances supplémentaires d'Ingénierie en conception mais aussi en intégration, en architecture et en validation.

- Il devra développer des compétences en gestion de projet car la complexité des produits conduira aussi à des temps de développement plus longs et à des diversités de produits plus importantes. De plus, l'intégration des modules avec les systèmes des clients demandera de nombreux échanges.

L'acquisition de ces connaissances peut alors prendre la forme soit de transferts entre DO et ST, soit d'embauches. Aussi ce transfert d'activité de conception semble conduire les donneurs d'ordres à intégrer plus tôt dans les phases de conception les sous-traitants (Catel et Monateri, 2007). Au niveau de la production, cela accentue l'interdépendance (financière, organisationnelle, géographique, etc.) des constructeurs et de leurs sous-traitants. Sako et Murray (1999) notent aussi que ce mode d'approvisionnement anticipe la création de valeur dans la chaîne logistique. Cela impose donc une proximité géographique des sous-traitants pour éviter de trop importants besoins de trésorerie. C'est d'ailleurs ce qui semble avoir été mis en place par Daimler dans l'usine d'Hambach en charge de la production de la Smart ForTwo. Les fournisseurs ont des lignes d'assemblage sur le site et produisent en synchrone avec la ligne d'assemblage final (cf. Figure 29).

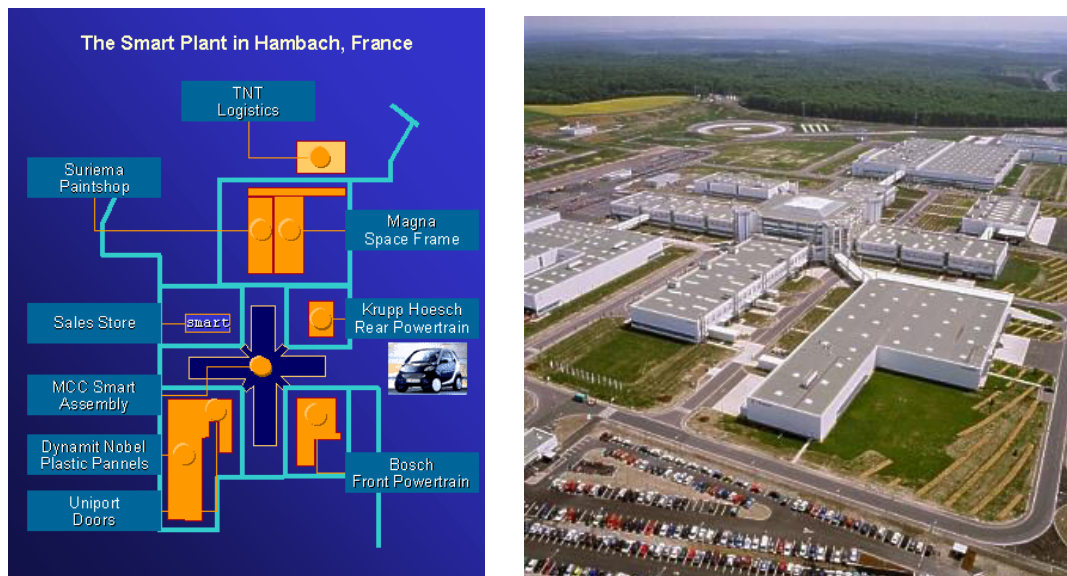


Figure 29 : Organisation synchrone à l'usine Daimler d'Hambach

Certaines entreprises ont aussi développé des relations plus étroites avec leurs fournisseurs en phase de production. Le cas de l'usine Volkswagen de Resende (Brésil), produisant des camions et des bus, semble en rester l'exemple le plus marquant. En effet, en 1996 Volkswagen (VW) inaugura une usine d'un genre nouveau basée sur un *Consortium* de fournisseurs. Cette nouvelle organisation, première mondiale à l'époque, fut source de nombreuses études (Abreu *et al.* 2000, Collins *et al.* 1997, Corrêa 2001, Marx *et al.* 1997, Ramalho et Santana 2002, etc.).

Poussant jusqu'au bout d'une logique de JAT (Juste à Temps) et basée sur une architecture modulaire de produits, la philosophie de cette usine était de laisser les sous-traitants responsables de la production des modules mais aussi de leur montage sur la ligne d'assemblage final. VW était alors seulement responsable du bâtiment, de la chaîne de convoyage des véhicules et du contrôle qualité final. Les fournisseurs au nombre de six, sont alors responsables de la fabrication des modules, au nombre de dix (Collins *et al.* 1997). Cela inclut alors aussi la gestion des fournisseurs de composants, l'approvisionnement de ces composants ou modules, qui peuvent être assemblés sur un autre site du fournisseur. Cette organisation ne réussit pas à tenir dans le temps notamment à cause de problème de qualité et des difficultés à faire améliorer le processus de montage qui était partagé.

Riche de cette expérience, Volkswagen développa alors le concept de *condominium* largement repris par les constructeurs les plus avancés en modularité et JAT dans le secteur automobile aujourd'hui comme Hyundai, Mazda, Volvo, Smart, etc. Cette organisation permet à VW de reprendre la main sur tout le processus d'assemblage mais les fournisseurs produisent de façon synchrone et dans l'enceinte du site la vingtaine de modules utilisés par VW. La proximité avec le fournisseur en production permet alors de minimiser les stocks, de minimiser les investissements car on approvisionne directement des modules complexes et de réduire le nombre de fournisseurs à gérer et donc la complexité des échanges informationnels.

Comme le montrent Galvin et Morkel (2001) dans l'industrie du vélo ou Catel et Monateri (2007) dans l'industrie des tracteurs, le rapport de force entre donneur d'ordres et sous-traitant évolue avec la modularité. Les relations traditionnellement asymétriques deviennent de plus en plus partenariales. À l'extrême, l'externalisation de systèmes complexes permise par la modularité peut rendre les fournisseurs plus puissants que les architectes (Galvin et Morkel, 2001).

2.2.2. Relations horizontales inter-firmes

Sans trop développer ce paragraphe à la limite de notre sujet de recherche, la modularité de produits, permettant la désintégration des donneurs d'ordres, induit des transformations des filières qui ne changent pas seulement les échanges verticaux mais aussi les relations horizontales. En premier lieu, la réduction du nombre de fournisseurs de premier rang engendre nécessairement le passage au second rang d'un certain nombre de fournisseurs. Aussi, cela conduit à une compétition accrue entre sous-traitants qui, pour emporter le marché, doivent au plus vite acquérir les compétences nécessaires à la prise en charge des modules. Le besoin pour certains fournisseurs d'acquérir de l'expertise dans des domaines inconnus jusqu'alors conduit

à un certain nombre de fusions-acquisitions entre sous-traitants. Ainsi comme le soulignent Friant (2013) ou Catel et Monateri (2007), ces bouleversements de filières participent à l'apparition de fournisseurs très importants notamment en termes d'implantation et de chiffre d'affaires (Marx *et al.* 1997).

Chapitre 7. La modularité de Renault

Renault a initié officiellement une démarche modulaire en 2009. Cette démarche se base exclusivement sur une modularité de produits et plus précisément à une modularité de conception au sens où elle ne s'intéresse pas à la modularité de production. Renault l'appelle *Conception Modulaire*. Renault vise, par cette démarche, à réduire les temps de développement de ses familles de produits et ses coûts. En fait, la *Conception Modulaire* relève alors éminemment d'une démarche de standardisation. La modularisation des produits mise en place nécessite donc de la part des ingénieurs de R&D une vision transversale aux familles de produits de la gamme, vision en rupture avec le processus historiquement en silos par projet. Les démarches de standardisation transversale à la gamme et dans le temps à chaque renouvellement de famille de produits ne sont pourtant pas nouvelles chez Renault mais en définissant une démarche modulaire, le Groupe cherche à intensifier cette recherche d'efficience.

Renault cherche donc à répondre à la gestion de la diversité par une approche de conception comme globalement l'ont fait d'autres constructeurs avant lui (Volkswagen, Volvo, Fiat, Hyundai, PSA, etc.). La *Conception Modulaire* est une démarche à l'initiative de la Direction de la R&D qui en est le pilote. Les autres Directions sont des parties prenantes de la démarche, la Direction des Achats étant la Direction la plus impliquée ensuite. Pour rattraper son retard, le groupe Renault a décidé de s'appuyer sur une démarche synchrone de définition de processus et d'implémentation des modules (généralement décrite comme le fait « d'apprendre en marchant »). Aussi, Renault a choisi de lancer ces modules par vague pour tenter de capitaliser plus rapidement tout en répartissant la charge de travail. Ainsi, sept vagues se sont succédé depuis 2009 avec au total environ 200 modules fin 2015. Comme nous le verrons, ce nombre important de modules traduit des écarts importants entre l'approche modulaire mise en place par Renault et celles décrites dans la littérature. L'analyse de la modularité Renault nous permettra de voir que cette différence n'est pas sans conséquence sur la performance de la démarche et notamment sur son impact sur l'ensemble des métiers de l'entreprise.

Au §1, nous présenterons la situation avant la modularité. Dans le §2, nous décrirons et analyserons la modularité de produits mise en place par Renault. Pour permettre la commonalité entre familles de produits, nous verrons que la stratégie de Renault a alors été de définir un nouveau processus de conception afin de permettre une vision de la diversité technique transversale à toute la gamme. L'organisation mise en place au sein de la Direction de la R&D

de Renault n'est pas neutre sur la performance de la démarche. Dans le §3, nous la décrivons et l'analyserons pour en mettre en évidence les avantages et les limites.

1. La situation avant la mise en place d'une démarche modulaire

1.1. Organisation des processus de conception par famille

Historiquement, la diversification des produits est un des piliers de la stratégie de Renault. Au fil du temps, les directions du Groupe se sont donc organisées pour pouvoir développer une diversité très importante de produits. Les nombreuses synergies avec Nissan dans le cadre de l'Alliance soulignent la réelle capacité de Renault à gérer de façon structurée des diversités de produits et de composants très fortes.

La Direction de la R&D de Renault fonctionne donc avec une structure matricielle permettant un découpage très important entre chaque projet de famille de véhicules animé par une équipe dédiée et un découpage entre les équipes en charge de la conception des solutions techniques (cf. Figure 30). Au fil du temps, cette structuration a largement influencé les processus et les outils informatiques du Groupe à l'instar des systèmes de nomenclature décrits et théorisés dans la Partie II Chapitre 4 (p85) de cette thèse.

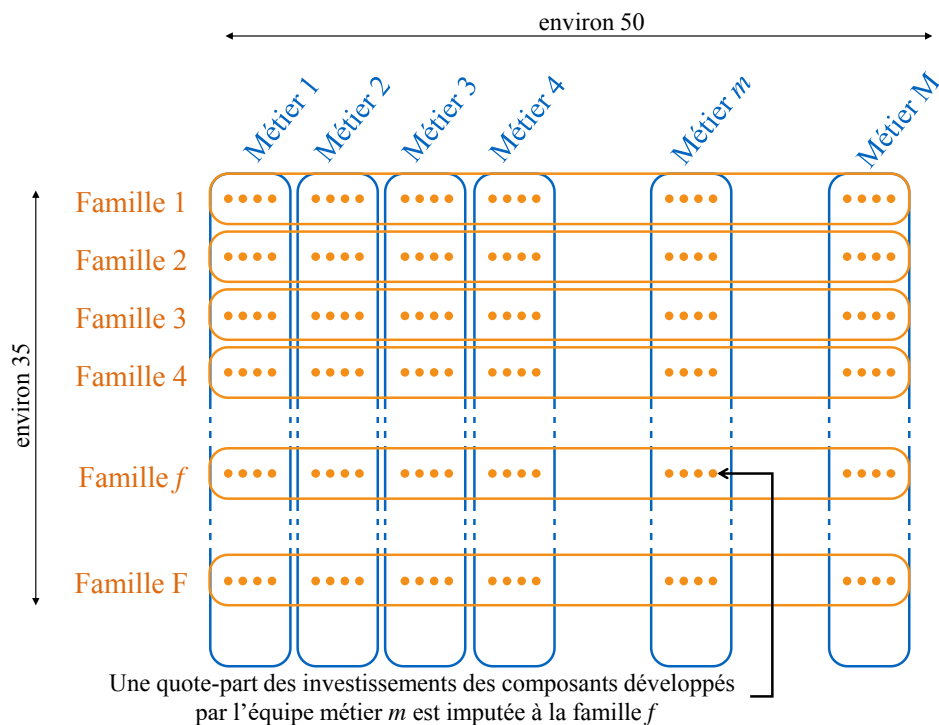


Figure 30 : Organisation projet de la Direction de la R&D Renault et responsabilité budgétaire avant la mise en place de la Conception Modulaire

Pour rendre gérable la diversité interne, les organisations comme les outils se sont largement appuyés sur la structure naturelle qu'offre le découpage en famille de produits. Ce découpage a eu pour conséquence de permettre une croissance forte de la diversité technique au fil du temps. L'autonomie donnée à chaque projet de famille associée à des logiques de conception à coût objectif (*design to cost* en anglais) dues à une pression toujours plus forte sur la rentabilité des projets, a eu tendance à favoriser des logiques d'optimisation locale par projet. Ces logiques d'optimisation ont permis lors de chaque conception d'une nouvelle famille de justifier des solutions fonctionnelles et/ou technologiques et/ou techniques particulières.

Le processus de conception se définit comme la traduction d'une définition commerciale de la diversité d'une famille de véhicules en une définition technique en composants à assembler. Ce processus est découpé en étapes, qui de manière progressive, permettent de passer d'une définition commerciale d'une diversité souhaitée à une définition fonctionnelle puis technologique puis technique de la diversité interne. À chaque étape, le nombre d'items à gérer est plus grand qu'à l'étape précédente parce que la maille de définition des items s'affine à mesure que le processus se déroule. Chaque étape de ce processus nécessite la réalisation de l'étape précédente mais elle peut aussi l'influencer à l'image des boucles de contrôle en automatique (cf. [Figure 31](#)). Le contrôle porte alors sur la faisabilité ou l'impact sur les coûts et/ou la qualité. Classiquement, ce processus de conception doublé d'un processus de validation ou de contrôle est représenté par un « V » dont la branche descendante représente le processus de définition alors que la branche ascendante représente le processus de validation. Aussi, ce processus peut se représenter comme une suite de boucles comme l'illustre le schéma suivant. Chaque boucle est un « mini V » comportant à la fois une phase de définition et une phase de validation. Cette organisation donne beaucoup de poids à l'équipe en charge d'un projet de famille de véhicules qui est animée par une vision commerciale de l'offre produits souhaitable. En effet, ce sont elles qui sont responsables du budget nécessaire à la mise sur le marché d'une nouvelle famille de produits. Ce type d'organisation a largement été mis en place dans l'industrie de masse à la fin du XXème siècle et visait à passer d'une conception poussées par les ingénieurs de conception à des projets tirés par le marché c'est à dire par le besoin client exprimé par les équipes de projet de famille de produits (orienté marketing et commerce donc).

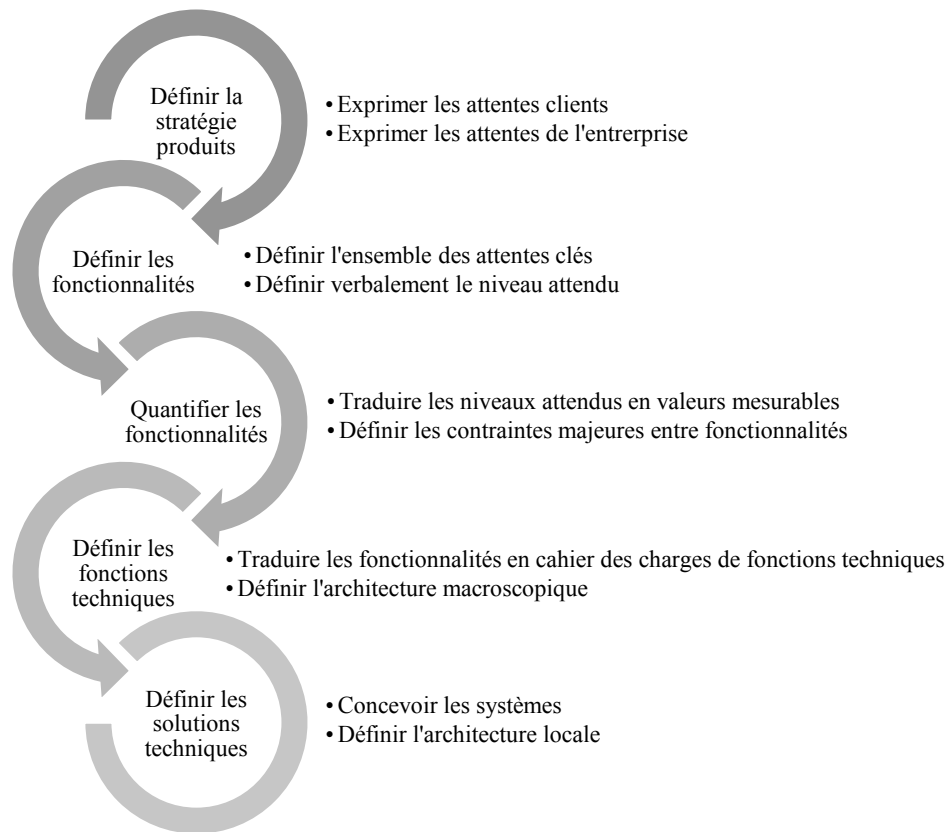


Figure 31 : Représentation du Processus de conception

L'organisation en projet de la Direction de la R&D présentée ici pour les familles de véhicules existe aussi pour les familles de moteurs et de boîtes de vitesse. Ces systèmes font donc l'objet d'une organisation particulière car leur développement n'est pas lié qu'à une seule famille. Il existe donc aussi des équipes métiers et des familles dites « mécaniques » en plus de celles que nous avons évoquées dans ce paragraphe.

1.2. De la préexistence d'une forme de « modularité »

La diversité de produits finis propre à l'automobile a conduit depuis longtemps les entreprises à concevoir la diversité technique de composants par variante interchangeable. Cette façon de concevoir et de produire la diversité n'est pas propre à l'automobile. Elle permet d'offrir aux clients une grande diversité à partir d'un nombre restreint de composants. Les familles de produits sont d'ailleurs bien par définition des ensembles de produits très proches se différenciant seulement par quelques variantes de composants. Cette approche historique d'une forme de « modularité » a deux limites majeures. D'abord, l'interchangeabilité est ici permise à un niveau de nomenclature très fin : celui des composants alternatifs. Ensuite, la transversalité de ces CAs ne dépasse historiquement pas le périmètre d'une famille de produits. La

standardisation était donc alors essentiellement à entendre au sein d'une famille donnée. La commonalisation n'est donc pas un concept complètement nouveau en automobile, mais « la première approche » était biaisée par le découpage en silos des processus, outils et budget offert par la structuration de l'organisation par projet de famille indépendant.

Face à l'augmentation du nombre de familles et de la complexité et donc du coût que génère la diversité interne, Renault a alors cherché des solutions pour sortir des logiques locales, particulières à chaque projet de famille. Depuis plusieurs années, un indicateur de standardisation tente de forcer les équipes responsables de la conception de famille de produits à améliorer la commonalité des composants avec les autres familles. En effet, à chaque projet est demandé un certain pourcentage de pièces « COCA » pour *Carry-Over/Carry-Across* c'est à dire de pièces trans-génération (standardisation dans le temps) et trans-gamme (standardisation entre les familles d'une même génération). Sans changement d'organisation, cet indicateur avait tendance à plafonner (20% de la valeur d'un véhicule avant la mise en place de la Conception Modulaire en 2009), freiné par l'indépendance budgétaire des projets de famille et par la difficulté à partager de l'information (ou à la récupérer dans les systèmes) de manière transversale.

En parallèle et toujours dans le même but, des démarches a posteriori d'analyse de la diversité de composants en usine ont été mises en place. Toujours d'actualité, les chantiers « *Monosukuri* » ont pour but de traquer la diversité inutile et déjà créée qui n'est pas ou que très peu demandée. Ainsi, ces projets cherchent à réduire la diversité technique interne des usines en proposant de réduire certaines combinaisons de PAs trop peu demandées, c'est-à-dire la diversité commerciale offerte aux clients mais quasiment jamais choisie. Ces études longues et complexes permettent de diminuer la diversité interne des usines mais cette diminution reste marginale.

2. Attentes et définition de la modularité de Renault

2.1. Les attentes de la « Conception Modulaire »

La conception modulaire à deux buts majeurs.

- Réduire le coût total de mise à disposition sur le marché d'une famille de véhicules. La modularité n'étant pas définie par famille, cet objectif est transposé au niveau des modules en cherchant à réduire le coût total associé à chaque module. Ce coût appelé **TDC** pour *Total Delivered Cost* inclut une quote-part d'investissements de conception

et de production (en interne ou chez le fournisseur), les coûts d'achat, les coûts de transformation, les coûts logistiques (qu'ils soient fixes comme les emballages ou variables comme le transport) et les coûts de maintenance et de garantie.

- Réduire les temps de conception des véhicules (en anglais *time to market*). Comme nous l'avons noté au chapitre précédent, réduire le temps de développement est un enjeu important dans la compétitivité des entreprises de ce secteur. Le temps de développement d'une famille de produit est encore long (de l'ordre de trois ans) mais ce temps ne cesse de diminuer. Par la *Conception Modulaire*, Renault vise à mettre à disposition des futures familles de produits un nombre important de composants déjà conçus pour de précédentes générations. Cette commonalité de composants dans le temps que nous qualifions de commonalité temporelle (en anglais *carry over*) entre familles de produits permet de réduire les temps de développement en augmentant le taux de réutilisation.

La réduction de la diversité de composants est alors au cœur de la stratégie, comme le moyen d'atteindre ce double objectif. En pratique, ce moyen est souvent considéré à tort comme l'objectif de la *Conception Modulaire*. Cela est sans doute renforcé par les deux indicateurs choisis pour juger de la performance de la démarche en cours.

- La diversité de composants mesurée comme le nombre total de *Pièces*. Comme nous l'avons vu dans la Partie II Chapitre 4 §2.2, le terme *Pièce* a un sens explicite dans la *Documentation Technique* (les nomenclatures) de Renault. Pour rappel, les *Pièces* sont tous les composants résultants d'un assemblage ou non. Comme nous l'avons vu, en fonction du point de vue et de la Direction, le type de nomenclature et la maille de la *Pièce* ne sont pas nécessairement les mêmes. La modularité Renault étant définie en conception, c'est la nomenclature de conception qui est utilisée ici.
- La part (pourcentage) du TDC d'un véhicule pris en charge par des modules. Cet indicateur permet de s'assurer que la vision transversale que cherche à créer la Conception Modulaire s'impose à toutes les familles et à tout le périmètre fonctionnel d'une voiture.

Pour Renault, faciliter la réduction de la diversité de composants dans une entreprise qui continue à augmenter sa diversité offerte aux clients, conduit en réalité à améliorer au fil des générations de produits la réutilisabilité des composants. De fait, la diversité de composants ne diminue pas nécessairement mais au niveau global de l'entreprise, le ratio de la diversité offerte,

c'est-à-dire de produits fabricables sur la diversité technique, c'est-à-dire de composants nécessaires doit s'améliorer (c'est-à-dire croître).

2.2. Définition d'un module pour Renault

Chez Renault un module se définit comme « un sachet de Pièces » répondant à une ou plusieurs fonctions. Ces *Pièces* sont conceptuellement des composants alternatifs qui peuvent appartenir à différents ensembles de CAs. La diversité de prestations et de solutions techniques est représentée par des variantes. À chaque variante est donc associée un CA par ECA. Ce sachet de *Pièces* doit permettre de répondre à toute la diversité de prestations de la gamme à l'exception de quelques très rares variantes (comme les Renault Sport et Alpine). Le portefeuille de besoins que doit couvrir le module est défini par l'ensemble des véhicules en cours de production et des véhicules qui le seront dans les cinq prochaines années. Ce portefeuille de produits entraîne des visions dynamiques de la diversité. En effet la démarche modulaire ne peut pas en général changer les choix réalisés sur les modèles actuellement en cours de production. L'étude de l'efficacité des décisions prises se fait donc par la comparaison entre l'état de la diversité à aujourd'hui et son état prévu dans cinq ans. Comme nous l'avons déjà souligné au §2.1, l'indicateur retenu par le Groupe est un ratio entre la diversité commerciale de produits offerts et la diversité de composants nécessaires pour y répondre. Précisons que ce délai de cinq ans est très long¹³, il permet d'englober tous les projets de futurs modèles en cours de réflexion même très peu avancés. La conception modulaire cherche donc à définir des standards stables dans le temps. Elle vise en conception à développer des variantes qui seront réutilisables telle quelle dans de futures familles.

Tous les systèmes informatiques étant fondamentalement basés sur un découpage par véhicule, afin d'aider les ingénieurs dans la mise en place de la démarche, un outil a été développé. Il permet de générer des matrices à deux dimensions.

- L'axe des utilisations qui fait l'objet d'une déclinaison arborescente en « variantes d'usage ». Le nombre et le type de niveaux de décomposition différents d'un module à l'autre. On y retrouve les diversités commerciales (les PAs) et les diversités technologiques (architectures). Par exemple, on peut y retrouver des choix d'interfaces (ex : motorisation avant ou arrière pour le refroidissement moteur...), ou des choix de

¹³ A titre de comparaison, la vision stratégique usuelle en automobile est de trois ans, ce qui englobe le temps de développement d'une génération de famille de produits.

définition fonctionnelle (ex : radio/navigation ou radio seule, etc.), ou encore des choix d'implantation (ex : levier de vitesse dans le tableau de bord ou dans l'îlot central).

- L'axe des composants qui établit la liste des « *variantes Pièces* ». En pratique, cette liste est représentée sous forme arborescente sans pour autant être une nomenclature. Cette arborescence ne présente généralement pas de liaison composant-composé mais plutôt des liaisons d'héritage (au sens des diagrammes de classes UML) de type *is-a*. Cette arborescence permet de tenir compte d'investissements (R&D, industriel ou autre) partagés entre plusieurs composants. Par exemple, deux radiateurs différents par leur taille peuvent être issus de la même maquette numérique (qui est donc paramétrique) et/ou peuvent nécessiter les mêmes filières pour produire les ailettes qui les composent et le même four pour les braser... (seule la mise à la longueur par coupe est différente). Ces deux radiateurs partagent donc des investissements, ils ont donc un nœud commun dans l'arborescence des *Pièces* pour les représenter. Ces composants peuvent être déjà disponibles (c'est le cas de ceux utilisés par des véhicules déjà en production) ou en cours de conception.

Ces deux axes dessinent une matrice à deux dimensions qui permet au niveau le plus fin d'associer à chaque variante d'usage une *variante Pièce* (un CA). La force de la démarche est d'avoir placé ces deux axes orthogonalement alors qu'avant, l'axe des composants prolongeait l'axe des utilisations dans un découpage par famille. Cela permet une vision transversale des besoins permettant à la fois de comparer les besoins entre eux et d'offrir une lecture qui met en relief les partages de *Pièces* entre les variantes d'utilisation.

La notion de sachet ne préjuge pas non plus de l'existence de cet assemblé sur la chaîne de production et donc dans la *DocT de Production* (i.e. la nomenclature de production). Le module refroidissement est par exemple un composant fantôme au sens de Lamouri et Thomas (2000) dans les usines de carrosserie montage.

L'absence de réflexion d'architecture en amont des solutions techniques empêche la simplification de la diversité par la standardisation des interfaces. Il en résulte que chaque module est encore très contraint par les autres modules. L'absence de standardisation des interfaces ne permet pas de gain de temps possible par le travail en parallèle des équipes module.

Finalement, la construction du module répond à des décalages dans les visions des différentes Directions de l'entreprise. Par exemple, les ingénieurs de R&D parlent de *PG (Pièces Génériques)*, cf. Partie II Chapitre 4 §2.2), les acheteurs de *commodités* sans que le lien entre les deux soit clairement codifié. De plus, le développement historique en silos par famille a conduit

à une non-homogénéité des découpages entre famille pour une même Direction. Par exemple, chez Renault il existe de l'ordre de 46 000 *PGs* alors qu'une famille n'en utilise que quelques milliers. La définition de modules vus comme des regroupements de *Pièces* répond donc à un besoin de définition d'un cadre commun à toutes les Directions du Groupe et à toutes les familles pour découper la diversité fonctionnelle et technique.

La modularité définie ainsi ne permettra pas de développer une modularité de Production car elle ne permet pas de changer la façon de penser la production. Ceci nous semble regrettable au vu du gisement de performance que constitue cette forme de modularité de produits largement décrite au chapitre précédent et déjà mis en place par bon nombre de concurrents aujourd'hui. Il n'en est pas moins que la diversité des *Pièces* à concevoir devrait diminuer et avec elle, les investissements de conception.

2.3. L'absence d'architecture modulaire

Chez Renault, la définition des modules n'est pas fondée sur une réflexion sur la définition d'une architecture modulaire. Il n'est pas question de découpage fonctionnel ou de standardisation des interfaces pour définir les modules. Les modules étant définis comme des sachets de *Pièces*, les ingénieurs de la Direction R&D décident directement la constitution des modules au niveau des composants.

En fait, la détermination des *Pièces* qui constitueront ce sachet se fait par les ingénieurs de conception selon leur périmètre d'expertise. De manière classique, les métiers de la conception sont découpés par groupe fonctionnel du produit (il y en a une cinquantaine chez Renault). Indépendamment de la modularité, une équipe en charge d'un groupe fonctionnel conçoit un certain nombre de composants et cela pour l'ensemble des projets de famille de véhicules du Groupe. Chaque équipe propose donc des modules à l'intérieur de son périmètre. Nous développerons en détail les limites de cette approche au §3.2.

Aussi, la notion de sachet ne préjuge en rien de la maille de définition des modules. Une variante de module pouvant être ou non le résultat d'un assemblage de *Pièces*. Par exemple, le module *refroidissement* est un assemblage de cinq ou six *Pièces* (radiateur(s), condenseur, refroidisseur d'air de suralimentation, Groupe Moto Ventilateur, guide d'air), tandis que le module plafonnier n'a qu'une seule *Pièce* par variante. Un module peut donc regrouper une ou plusieurs fonction(s) et la maille de définition des modules est potentiellement différente pour chaque module.

Si on poursuit l'exemple du module *refroidissement*, ce module est dans le groupe fonctionnel *refroidissement moteur*. En fait, dans ce périmètre ont été définis deux modules, le *refroidissement* et le *circuit de refroidissement* (circuits, pompe, vannes et réservoir). Ce découpage résulte d'un choix par l'équipe en charge du groupe fonctionnel, il aurait très bien pu définir un seul module constitué de tous les composants ou autant de modules que de composants. De même le condenseur étant un des éléments de la fonction climatisation, il aurait pu être rattaché au groupe fonctionnel *thermique habitacle*, si tel avait été le cas, le condenseur ne serait pas dans le module refroidissement. Cela montre bien encore l'influence de l'organisation sur le périmètre des modules.

Enfin, la façon de constituer les sachets de *Pièces* permet ni d'atteindre l'indépendance des modules ni la possibilité de tester de façon indépendante chaque module (utile pour la qualité, cf. chapitre précédent). En effet, il est impossible de tester la performance du module *refroidissement* sans le module *circuit de refroidissement*. Cela traduit en fait qu'un module n'est pas seulement défini par une seule fonction technique et qu'une fonction n'est pas nécessairement satisfaite par un seul module. En effet, le module refroidissement répond partiellement à plusieurs fonctions. Comme nous l'avons vu, bien qu'ils constituent les éléments principaux des circuits de refroidissement, le module *refroidissement* ne répond pas entièrement à une fonction refroidissement moteur. Aussi, le refroidisseur d'air de suralimentation est l'un des éléments répondant à la fonction suralimentation (comme le Turbo) et le condenseur de climatisation à la fonction thermique habitacle.

In fine, il semble que pour Renault les modules soient définis d'avantage en fonction d'un couple technologie/fournisseur. En effet, les radiateurs et autres condenseurs sont tous des échangeurs air-air ou air-eau (cf. détail Partie IV Chapitre 11 §1.1) et ils sont tous schématiquement constitués de tuyaux et d'ailettes. Les technologies étant très voisines, les fournisseurs de radiateurs sont généralement, à l'instar de Valeo Thermal System, des fournisseurs de condenseurs et de refroidisseurs d'air de suralimentation. Nous comprenons donc que le découpage d'un module ne répond pas « simplement » à un découpage fonctionnel d'architecture.

3. Organisation du processus de conception Renault

3.1. Un processus de conception des modules transversal

Comme nous l'avons vu au paragraphe précédent, les équipes métiers de la Direction de la R&D sont responsables du découpage en modules, de leur nombre et du nombre de variantes pour chacun d'eux.

La relation client-fournisseur entre ces équipes métiers et les représentants des projets véhicules a été amoindrie. Ces équipes métiers, responsables de groupes fonctionnels (pour rappel, il y en a une cinquantaine), doivent toujours répondre au cahier des charges fonctionnel spécifié par le marketing mais ils sont aussi propriétaires du budget d'investissements historiquement rattaché au projet client (cf. [Figure 32](#)). La décision finale de l'application d'une variante de module sur un projet véhicule doit être validée par les ingénieurs de conception propriétaires et garants du budget et par les responsables du projet. Cette nouvelle distribution des rôles est un changement profond dans l'organisation de l'entreprise. Elle vise d'abord par le transfert du budget à donner plus de moyens aux métiers pour standardiser les *Pièces* entre projet. Ce transfert de budget permet aussi de faciliter l'innovation. Avant, le premier projet développant une nouvelle solution devait en supporter l'investissement dans sa totalité, aujourd'hui c'est le métier qui a alors à sa charge ensuite de la « vendre » aux projets de famille véhicules.

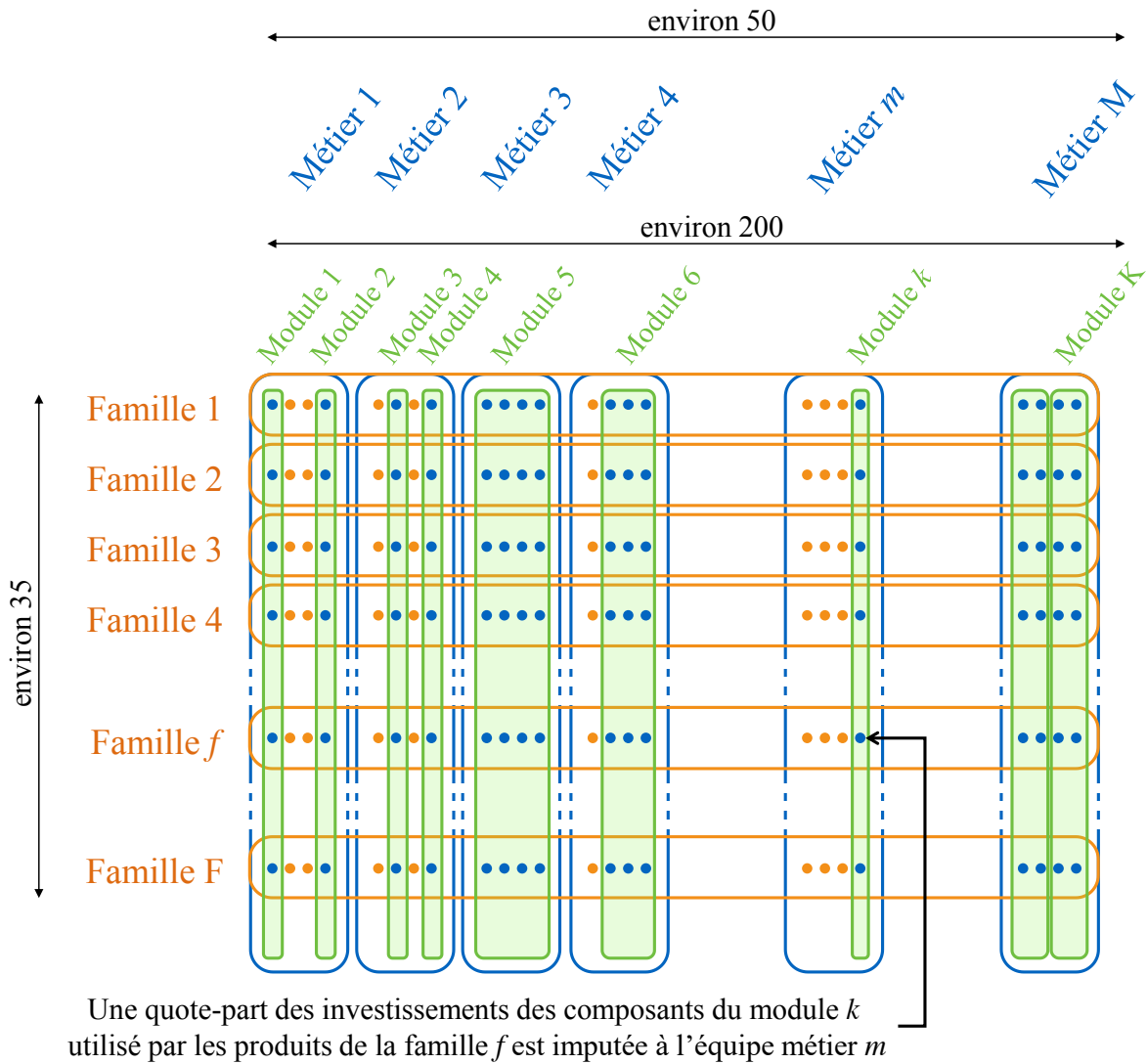


Figure 32 : Organisation projet de la Direction de la R&D Renault et responsabilité budgétaire après la mise en place de la Conception Modulaire

Pour sortir d'une logique en silos par projet, les modules doivent s'appuyer sur une vision transversale que l'organisation doit permettre. Il faut donc de nouveaux processus et instances de décision. La mise en place de cette nouvelle démarche est pilotée par une entité spécifique rattachée à la Direction de la R&D du Groupe. Afin d'accompagner les ingénieurs de conception dans cette vision, un certain nombre de règles et d'outils ont été mis en place. L'usage de règles d'entreprises permet à tous les métiers de s'impliquer dans la démarche. Ainsi, par exemple un module doit couvrir avec ses variantes à minima 80% de la gamme et 100% des futurs projets. Aussi, pour chaque groupe fonctionnel a été défini un ratio de *Pièces* devant appartenir à des modules (ce ratio faisant l'objet d'un indicateur pour les responsables de chacun de ces groupes fonctionnels). Ces deux règles permettent d'abord de forcer la création de modules et ensuite, d'y imposer une vision transversale à la gamme.

De façon concrète, les équipes métiers en charge de la conception des *Pièces* sont chargées de proposer des périmètres de modules. Ces propositions font alors l'objet d'une pré-étude de faisabilité avec entre autres, des architectes d'intégration locale et des représentants des différents projets de véhicules. Si le module est retenu, démarre alors un processus de définition des solutions techniques à venir sur l'horizon des cinq ans avec la définition des évolutions, des choix de fournisseurs sachant les usines qui produisent et produiront les modèles. Ce processus démarre par la proposition de deux ou trois scénarii qui vont être comparés économiquement. Chaque scénario fait alors l'objet d'un chiffrage par toutes les Directions : R&D, Production, Achat, Logistique, Douane pour obtenir une estimation du *TDC* (Total Delivered Cost). Ce *TDC* permet le calcul de la valeur actualisée nette (VAN) sur l'horizon des cinq ans de chaque scénario. Tout ce processus est animé par des responsables dans les équipes de conception qui doivent régulièrement présenter leur avancement à l'équipe qui pilote la mise en place de la conception modulaire accompagnée de représentants des équipes projets en charge du développement des véhicules. La participation de ces derniers est essentielle car le métier qui propose un module doit s'assurer de l'utilisation dans tous les projets des solutions techniques qu'ils proposent. Ceci fait l'objet de nombreuses discussions puisque la mise en commun de variantes peut nuire localement à la performance économique et ou technique de certaines familles de produits. Le choix final d'un scénario est validé par la Direction de la R&D qui engage alors tous les métiers concepteurs sur leurs chiffrages *TDC* et les Directions des projets de familles de véhicules sur leur utilisation des variantes.

3.2. Une définition des modules contingente à l'organisation du Département R&D

La définition du périmètre d'un module dépend en fait intimement de la répartition des fonctions au sein des métiers dans l'organisation puisque chaque proposition émane des équipes métiers de la Direction de la R&D. En effet, comme les modules sont proposés par les équipes métiers, ils se limitent à leur domaine de compétence. Ce choix s'avère très conservateur en termes de solution. De plus, cela aboutit à la définition de petits modules en grand nombre.

L'absence de réflexion amont sur la standardisation des interfaces associée à des optimisations locales au sein des équipes métiers implique une dégradation de la performance globale de la définition des solutions techniques. En effet, parfois, l'utilisation de certaines variantes d'un module dans un projet peut demander un changement d'interfaces. Les composants reliés ne sont en général pas inclus dans le périmètre des équipes métiers en charge du module ou du

moins sous leur responsabilité en termes de budget. Ces équipes métiers ne sont donc pas responsabilisées lorsqu'elles proposent des interfaces non standardisées. Lorsqu'il s'agit d'interfaces entre deux modules, des instances de décisions peuvent arbitrer en choisissant la meilleure solution pour le Groupe. Lorsqu'il s'agit d'interfaces avec un composant ne faisant pas partie d'un module, la modification de l'interface est à négocier avec chaque équipe en charge d'un projet de famille de véhicules. Cela est donc source de coûts additionnels et d'une perte de temps dans la conception d'une famille de produits (re-conception, discussions itératives soit entre équipes métiers soit entre une équipe métier et les équipes projets, etc.). Parfois la modification d'interfaces conduit à développer des composants dits de jonction permettant de relier deux composants aux interfaces non compatibles. Ces composants de jonction sont générateurs d'une diversité supplémentaire qui peut d'ailleurs être source de difficulté en production notamment lors de la planification des besoins.

Dans les faits, pilotée par la Direction de la R&D, la démarche modulaire de Renault se focalise prioritairement sur la baisse des coûts de développement et n'exploite pas en production le formidable levier de la modularité. Ceci est accentué par un calcul de coût avec le TDC qui peut faire perdre de vue l'impact positif de la démarche sur le besoin en fonds de roulement en production et en logistique.

Aussi, c'est en s'intéressant concrètement de manière inductive à expliquer comment sont définis les modules que l'on comprend que la vision actuellement développée dépend aussi des véhicules ou des composants existants. En effet, les familles déjà développées avant la mise en place de la *Conception Modulaire* ne permettent généralement pas un changement radical d'organisation et d'architecture en proposant des composants déjà développés et déjà amortis. Ainsi, certains modules risquent d'avoir une diversité de composants sensiblement stable à court et moyen terme.

Chez Renault, la démarche modulaire ne se traduit donc pas par un changement de périmètre de travail mais par un changement de responsabilité doublé d'une mise à plat de la variété existante et à venir. Là où avant le concepteur devait répondre au besoin de chaque projet véhicule de manière isolée, il doit désormais définir simultanément les solutions qu'il déploiera dans l'ensemble des projets. La démarche modulaire offre donc chez Renault une formidable vision transversale permettant de rompre avec l'organisation en silos selon les familles de véhicules mais qui reste bridée par le découpage par groupe fonctionnel des métiers concepteur.

Chapitre 8. Analyse de la mise en place de la modularité

Ce chapitre vise à synthétiser l'état de nos réflexions sur la mise en place d'une modularité de produits et ses conséquences organisationnelles à la vue de nos lectures et des trois années d'étude du Groupe Renault. Que la modularité de produits soit de conception ou de production (au sens décrit au Chapitre 6 §1.1), c'est une activité majeure de la Direction de la R&D. Nous parlerons donc souvent dans ce chapitre de la modularité sans préciser son orientation en se focalisant sur le fait que la définition des modules est de la responsabilité de la R&D.

D'un point de vue académique, au-delà de l'étude de l'approche de Renault présentée au chapitre précédent, notre apport est ici de soulever des questions pratiques importantes et pourtant quasi absentes dans l'abondante littérature analysée. La conception modulaire telle qu'elle est présentée dans la littérature reflète une simplicité qui lui donne beaucoup d'avantages qu'il convient de nuancer ou du moins de conditionner quelque peu sans les supprimer.

D'un point de vue opérationnel, nous voulons fournir aux managers à la fois une mise en perspective et une description de quelques points clés pour la réussite d'une approche de modularisation.

Nous verrons au §1 les conditions à la mise en place d'une modularité efficace. Le §2 nous permettra de montrer l'impact sur la chaîne logistique d'une modularisation des organisations.

1. Les conditions de réussite d'une modularité de produits

1.1. La définition d'une architecture modulaire claire

La dimension architecturale de l'approche modulaire doit être prise avec le même niveau d'importance que l'était plus tôt la définition des plateformes. La définition d'une architecture doit être un prérequis à la fois à la conception des modules et à la définition d'un nouveau projet de famille de produits. Cette étape est nécessaire pour une bonne coordination des équipes responsables des modules et pour une optimisation des coûts.

1.1.1. Le découpage fonctionnel : une question de granularité

La définition d'un module par une fonction est communément admise par la communauté scientifique mais elle est néanmoins difficilement exploitable en pratique tant que l'on n'a pas défini concrètement quel est le niveau de définition pertinent pour chaque fonction. Cette question est trop souvent oubliée dans la littérature traitant de la définition des modules en

conception. De plus, doit-on définir tous les modules au même niveau fonctionnel ? Les réponses à ces questions sont loin d'être évidentes.

La définition d'une seule fonction complexe permet de définir le module à une maille agrégée plus pertinente économiquement. Par exemple, en automobile un des modules les plus complexes est le groupe motopropulseur, on peut lui assigner une seule fonction : permettre le déplacement autonome d'un véhicule. Cette fonction peut se décomposer de manière arborescente, le premier sous niveau serait alors composé de deux sous-fonctions: (1) créer de l'énergie, (2) transformer cette énergie en mouvement. Cette décomposition fonctionnelle aboutit au niveau le plus bas à la définition de fonctions élémentaires qui se traduisent alors en composants (ex : la fonction élémentaire *créer l'étincelle dans le cylindre* est réalisée par le composant élémentaire *bougie*).

À des niveaux trop hauts (i.e. trop proches du produit fini), la standardisation des interfaces peut s'avérer redoutable. À des niveaux trop fins, le nombre de modules imposerait une fixation d'un trop grand nombre de paramètres pour obtenir la standardisation de toutes les interfaces.

- À un niveau extrêmement fin, le module est à la maille d'un composant assemblé sur la ligne. La standardisation de toutes les interfaces entre modules définis à ce niveau ne permettrait pas de générer la diversité que les entreprises souhaitent offrir. En effet, par exemple un moteur est un assemblage de plus de 250 composants ; standardiser les interfaces des moteurs (dimensionnement, position, alimentation, refroidissement, échappement, électronique...) permet de figer un certain nombre de contraintes sans brider la diversité des motorisations. Mais si on voulait faire ce travail pour chacun des composants du moteur de façon systématique, on ne pourrait plus générer la diversité voulue, par exemple à encombrement global constant, le dimensionnement de certains composants peut varier pour répondre aux différents niveaux de besoins.
- À un niveau trop haut, le module est à la maille du produit fini ou dans une grossière subdivision fonctionnelle de celui-ci. Le module peut alors contenir un nombre important de variantes. Il est alors primordial de permettre la substituabilité des variantes mais à un niveau trop agrégé pour un produit complexe comme une voiture, la substituabilité des variantes est en pratique impossible à maintenir. En effet, plus on remonte dans la nomenclature, plus l'assemblé répond à un nombre important de fonctions différentes, les variantes deviennent alors complexes ce qui freine la substituabilité.

Renault a fait le choix de définir ses modules à partir des composants et non des fonctions. Ce choix n'est pas équivalent. En effet, l'arborescence fonctionnelle ne définit pas a priori l'arborescence des composants car toutes les fonctions de chaque niveau de l'arborescence ne peuvent pas être associées de manière systématique à un composant identifié par une référence et certains composants répondent à des fonctions parfois éloignées dans l'arborescence fonctionnelle. Aussi, en décrivant progressivement l'arborescence fonctionnelle, les ingénieurs font nécessairement des choix sur des critères techniques (exemple : coordonnées localisant le moteur dans le véhicule ou le type d'énergie, etc.), ce qui réduit progressivement les possibilités d'innovation (par exemple au niveau 0 ou 1, on peut introduire le moteur électrique ou l'hybridation mais pas ensuite, etc.). La définition des modules à partir des composants résultant du niveau le plus fin de cette décomposition fonctionnelle freine l'innovation.

Il est donc nécessaire de définir un compromis sur la granularité du module dans la nomenclature qui permette, à la fois, une standardisation des interfaces précises et une gestion de la diversité offerte ad hoc par une diversité restreinte de modules et de composants. En fait, le niveau de granularité de chaque module dépend aussi d'autres paramètres intimement reliés avec l'intérêt particulier de chaque entreprise mettant en place la conception modulaire.

- Si la conception modulaire est essentiellement tournée vers la réduction du temps et des coûts de développement, la finesse dépendra largement du découpage organisationnel en place au sein de la Direction de la R&D.
- Au contraire, si la modularité est essentiellement centrée sur une amélioration de la performance industrielle de l'entreprise, le périmètre des modules tiendra compte à la fois des niveaux d'achat de composants (frontière *make or buy*¹⁴) et des niveaux de nomenclature propices à la différenciation retardée. Si on schématise le spectre de la diversité en fonction du niveau de nomenclature comme dans la figure ci-dessous, les modules de production doivent être placés aux niveaux de nomenclature où ils permettront de réduire au maximum la diversité à stocker et/ou à approvisionner.

¹⁴ C'est le niveau frontière entre les composants fabriqués en interne et les composants achetés. Ce niveau est propre à une organisation, voire à des couples produits/usines et évolue dans le temps, ce qui est source de difficulté dans les démarches de modularité de production.

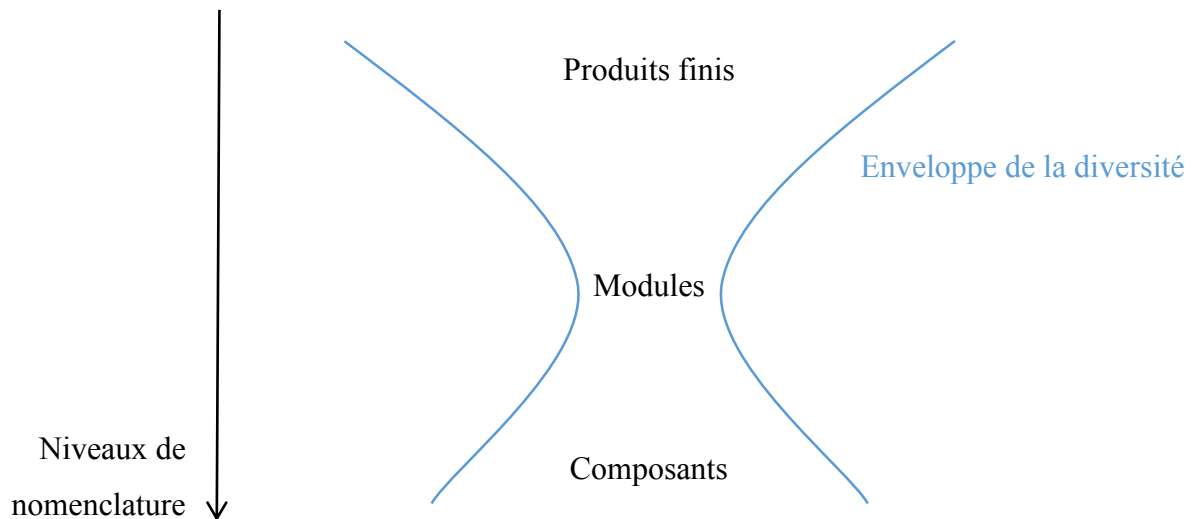


Figure 33 : Spectre de la diversité en fonction du niveau de nomenclature

1.1.2. La définition d'interface standard : une question au cœur des enjeux organisationnels

La définition d'interfaces standards permet de générer une très grande diversité de produits finis de façon simple. La définition au plus tôt des interfaces entre modules permet de préciser les découpages et les échanges (d'énergies et/ou d'information par exemple) entre modules. La définition d'interfaces supprime les contraintes entre modules ou du moins les réduit fortement. Cela permet de générer une diversité de variantes pour chaque module indépendamment des autres et donc potentiellement de faire évoluer un module sans devoir reconcevoir tous les autres qui y sont reliés.

La standardisation de ces interfaces dans le temps offre une stabilité qui permettra de faire évoluer la diversité offerte de façon plus rapide et moins coûteuse par ajout ou suppression ou modification de variantes de modules. Cette stabilité dans le temps des interfaces et sur la gamme de produits est aussi à la base d'économies d'échelle à la fois en conception, en production et en usage (réparation, entretien, garantie). Par exemple, en automobile les fabricants doivent produire des pièces de rechange pendant dix ans après la fin de commercialisation d'une famille de véhicules. La stabilité des interfaces permet de réduire les coûts liés à ce suivi en permettant par exemple, l'usage d'une variante récente sur un véhicule d'ancienne génération. Cela est source d'économies importantes en limitant le besoin de maintenir une diversité d'outil en production pour fabriquer une diversité de composants qui sont peu demandés.

La définition d'interfaces est indissociable du découpage fonctionnel. En effet, certaines fonctions élémentaires (notamment celles de mesure) sont nécessaires pour plusieurs fonctions

macroscopiques différentes. Le découpage fonctionnel, associant cette fonction élémentaire à une fonction macroscopique particulière, impose la définition d'interfaces pour permettre le partage de la fonction élémentaire. Prenons l'exemple plus parlant de la fonction élémentaire *mesurer la pression sur la pédale de frein*. Cette fonction élémentaire est utilisée pour différents sous-systèmes comme la boîte de vitesses (impossible de quitter la position parking de la boîte automatique sans appuyer sur le frein) ou le régulateur de vitesse (désactivation du régulateur par pression de la pédale de frein) ou encore le système de freinage (action de freiner et allumage des feux arrières). Le découpage fonctionnel permet de savoir si cette fonction élémentaire doit être un module ou un simple composant ou un élément d'un module. Supposons que cette fonction soit intégrée dans le module de freinage. La définition d'interfaces est ensuite nécessaire pour que la diversité des systèmes de freinage n'impose pas une diversité dans les modules de la boîte de vitesses ou du régulateur de vitesse. Cela souligne aussi encore une fois l'importance de définir l'architecture modulaire avant la conception à proprement parler des modules.

Aussi, la définition d'interfaces standards est un enjeu organisationnel. La définition d'interfaces standards permet aussi de limiter les échanges d'information entre les équipes en charge du développement de chaque module. La définition claire d'interfaces permet de mieux identifier les clients et les fournisseurs de flux (d'énergie, d'information, etc.).

1.1.3. La prise en compte de l'existant

Le choix des frontières des modules est donc une activité hautement stratégique, la modularité demande donc une gestion particulière. La complexité d'une telle vision n'est pas tant dans sa compréhension que dans son application dans des industries déjà existantes. Dès lors qu'il existe des projets à différents stades dans leur cycle de vie, la mise en place d'une nouvelle approche du produit est très délicate. Il paraît évident que la généralisation d'une interface standardisée ne peut se faire qu'au fur et à mesure de renouvellements de gamme et/ou de modules. La mise en place d'un standard est donc nécessairement progressive compte tenu du calendrier des évolutions de chaque produit et/ou composant du portefeuille. L'intérêt économique d'utiliser au plus tôt le nouveau standard s'oppose aux logiques d'amortissement des investissements (R&D et industriels) des solutions déjà en place. Les choix dans le un nouveau projet sont alors en partie prédéterminés par les choix antérieurement effectués par l'entreprise. Par exemple, on peut définir un nouveau véhicule avec un nouveau GMP mais qui reposera sur un moteur existant. C'est une vision classique mais contestable qui est liée à un

calcul d'amortissement pas à un vrai raisonnement économique (cf. Gautier et Giard, 2000 sur ce problème de cohérence temporelle des décisions).

Aussi, la définition des modules tient nécessairement compte des partages d'activités (de production comme de conception) dans la chaîne logistique de l'entreprise. Par exemple, la répartition des connaissances et de compétences entre donneurs d'ordres et sous-traitants peut influencer la définition d'architecture modulaire en conception.

1.2. L'organisation de la Direction de la R&D doit être compatible

1.2.1. Une équipe d'architectes systèmes forte

La vision transversale qu'apporte la conception modulaire tend à ne plus considérer qu'un seul projet comme client mais l'ensemble des projets non seulement à l'instant t mais aussi sur un certain horizon. Les projets doivent donc accepter de dégrader certains de leurs ratios pour l'intérêt du Groupe. Les ingénieurs en charge de la définition de l'architecture doivent donc être dotés d'un soutien hiérarchique fort pour trancher la frontière des modules. En effet, des conflits d'intérêts interviendront nécessairement dans la définition des interfaces puisqu'elles engendreront des contraintes de conception plus ou moins fortes en fonction des choix retenus et du métier. Par exemple chez Renault, la définition des modules doit permettre à la fois de sortir d'un découpage budgétaire historique par famille de produits et de dépasser le découpage organisationnel par groupe fonctionnel. Pour cela, la définition de l'architecture modulaire doit sortir du cycle en « V », elle doit être définie avant même que l'ensemble des projets qui l'utiliseront soit connu. Cela suppose que la définition des modules doit se faire plus en amont. C'est donc une activité hautement stratégique puisqu'elle fige très tôt un certain nombre de choix qui limiteront la capacité de l'entreprise à s'adapter à des innovations sur le marché ou à des changements dans les attentes clients (l'hybridation dans les motorisations des voitures par exemple).

La définition de l'architecture est une activité qui nécessite donc beaucoup d'expertises sur chacun des domaines fonctionnels de conception mais aussi sur les contraintes d'assemblage en production et de maintenance (réparation) durant la vie du produit (accès facile aux différents organes d'usure par exemple). L'architecture doit donc être définie par une équipe transversale d'experts permettant la prise en compte de toutes les contraintes. Comme le souligne notre analyse de la littérature, cette activité génère une sur-activité en amont des projets pour limiter ensuite l'investissement dans le développement de chaque famille de produits.

1.2.2. La constitution de groupe projet par module

La majorité des travaux analysés considèrent séparément la modularité de produits et la modularité organisationnelle. Quelques travaux faisant le lien entre les deux modularités montrent essentiellement en quoi la modularité de produits permet ou conduit à une modularité organisationnelle. Mais sans remettre en cause ce lien, notre comparaison entre la littérature et la pratique de Renault nous permet de dire que la modularité de produits, pour être efficace, nécessite une modularité organisationnelle de la Direction de la R&D. D'abord comme nous l'avons dit au paragraphe précédent, la définition des modules nécessite de revoir l'organisation pour donner plus de pouvoir à l'équipe en charge de l'architecture des produits. Ensuite, comme l'architecture s'affranchit du découpage par groupe fonctionnel afin d'optimiser la définition des modules, il est nécessaire de définir de nouvelles équipes responsables du développement des modules. Ces équipes modules sont alors généralement des équipes pluridisciplinaires constituées d'ingénieurs venant de différentes équipes métiers de la Direction de la R&D. Ces équipes n'ont a priori pas forcément besoin d'être hiérarchiques ; en effet, le développement d'un module peut faire l'objet d'un projet animé par un management transversal fonctionnel.

Aussi, pour quitter les optimisations locales par projet, il est nécessaire de transférer le rôle d'arbitre des équipes projet de famille aux équipes modules. Cet arbitrage conduit à transférer la responsabilité budgétaire des fonctions incluses dans les modules aux équipes modules en charge de développer les solutions techniques. Ce transfert assure une optimisation des variantes transversales à la gamme et permet surtout à l'équipe en charge d'un module de définir et de mettre en œuvre une véritable vision stratégique permettant de standardiser les interfaces et de rationaliser la diversité de composants à l'intérieur des variantes du module.

Parce que l'indépendance absolue des modules peut être en pratique difficile à atteindre, il est aussi nécessaire de définir des outils et des instances de discussion permettant à la fois d'identifier tout au long du développement des contraintes entre modules et de faciliter le dialogue entre équipes en charge de modules différents. La vision systémique du produit aujourd'hui de plus en plus déployée dans l'automobile permet pour partie de faire cela. Il est alors important de nommer dans chaque équipe module un responsable des échanges avec les autres modules. Notons que cette problématique n'est pas propre à la démarche modulaire, la question du suivi des contraintes se pose aussi au niveau des composants.

2. Vers une modularité organisationnelle inter-firmes

2.1. La modularité de produits facilite une modularité organisationnelle

La modularité de produits conduit à rendre plus simple un produit complexe en le découpant en sous-systèmes c'est-à-dire en modules. Ce découpage peut se focaliser sur une simplification du processus de conception ou de production ou de l'ensemble des deux. Que la modularité de produits soit de conception ou de production, elle s'accompagne d'une réorganisation des processus. Ce changement organisationnel est souvent appelé modularité organisationnelle car, à l'image du découpage d'un produit en modules aux interfaces standards, l'organisation peut être découpée en équipes autonomes en charge du développement des modules.

En conception, le découpage clair du produit en modules gérés comme autant de projets permet de spécialiser des ressources de conception. La définition d'interfaces standards permet alors de limiter le nombre, la fréquence et la complexité des échanges entre les équipes en charge des modules. La définition d'une architecture modulaire permet donc de découper le processus de conception en projets indépendants ou du moins ayant des interactions bien identifiées. Par cette définition, la modularité organisationnelle nous rappelle la taylorisation. Il n'est plus question ici de composants et de tâches élémentaires mais de modules et de processus complexes entiers mais la modularité comme le taylorisme relèvent bien du double découpage du produit et de l'organisation.

En production, le découpage du produit en modules autonomes aux interfaces standards permet de repenser la fabrication des sous-systèmes et leur assemblage. Il est possible de limiter les opérations sur la chaîne d'assemblage final permettant une optimisation des moyens industriels et surtout une différenciation retardée permettant de mettre en place des logiques d'assemblage à la commande utiles dans le cadre de la personnalisation de masse. L'autonomie des modules assure la possibilité à la fois de les assembler et de les stocker mais aussi de les tester et donc d'en assurer la qualité.

Une grande partie des avantages de la modularité tient de ces changements organisationnels. De façon évidente, la baisse des coûts de production nécessite un changement d'organisation de la production ; en effet, la modularité de produits ne fait que permettre ces changements mais ne les impose pas. Il est donc nécessaire pour les entreprises de penser la modularité à la fois dans l'architecture de leurs produits et dans l'organisation.

2.2. De la modularité organisationnelle à l'externalisation

Cette modularité organisationnelle, vue comme le découpage des processus en sous-groupes autonomes d'activités, conduit à s'interroger sur la capacité à décentraliser ces sous-processus voire à les externaliser. La question de l'externalisation de l'activité est une question extrêmement complexe en soit, nous ne cherchons pas à en faire le tour ici mais nous nous interrogeons quant à l'impact de la modularité organisationnelle sur la désintégration verticale des entreprises.

Comme nous l'avons déjà montré, un certain nombre de travaux se sont intéressés à ce lien entre modularité et externalisation et d'ailleurs, un certain nombre d'entreprises voire d'industries semblent avoir déjà tranché cette question (l'informatique, l'électronique, l'industrie du vélo, etc.). Dans le secteur automobile, l'externalisation de la production et encore plus de la conception de systèmes complexes comme des modules, ne semble pas être généralisée à tous les constructeurs automobiles. A l'instar de Renault, un certain nombre de constructeurs continuent à développer les composants et les modules et à approvisionner dans leurs usines des composants pour fabriquer en interne les modules. La question est alors de savoir si cette relative concentration d'activités témoigne soit d'un contexte particulier à l'automobile, soit d'un choix stratégique des entreprises, soit simplement d'une inertie forte des choix passés et d'une relative jeunesse des approches modulaires dans ce secteur industriel.

L'automobile est un secteur déjà historiquement très désintégré. Aujourd'hui, plus de 80% de la valeur d'un produit est acheté. Cette désintégration de la production ne souligne pas explicitement la part de conception externalisée. En pratique en conception, le taux d'externalisation est inférieur à celui de la production bien qu'au fil du temps, les fournisseurs deviennent de plus en plus partenaires en co-concevant les solutions techniques. L'externalisation des modules peut alors être une suite logique dans une logique de partenariats de plus en plus développés entre le donneur d'ordres qui est l'architecte et des sous-traitants concepteurs et fabricants. Ce mécanisme de transfert peut être aussi encouragé par la complexification technologique de l'automobile. Par exemple, le système multimédia des véhicules, qui n'est pas une fonction au cœur des compétences des grands constructeurs, a d'abord été une activité faite en interne par les constructeurs qui ont développé des solutions propriétaires (Carminat pour Renault). Aujourd'hui, la complexification et l'évolution rapide des technologies de cette fonction ne permettent pas aux constructeurs de maintenir un investissement de recherche et de développement suffisant pour rester compétitif. Deux solutions existent alors. La première solution est de céder cette fonction à des entreprises

fournisseurs de solutions (TomTom, il y a quelques années, GOOGLE et APPLE aujourd'hui) qui ont les moyens de rester à la pointe de la technologie. La seconde est de développer des partenariats avec des concurrents pour partager les investissements nécessaires (exemple du rachat de Here Maps, ex-filiale de Nokia par plusieurs constructeurs allemands pour ne pas être dépendants des deux géants du secteur).

Dans le secteur automobile aussi, l'externalisation peut être une suite à la mise en place de la modularité organisationnelle comme le démontrent certaines entreprises. Volkswagen, pour ne citer que l'entreprise à la fois quasi leader mondial et la plus avancée dans la modularité, le Groupe a depuis plus de vingt ans mis en place une organisation modulaire qui a conduit à externaliser un grand nombre de ses activités (cf. Chapitre 6 §2.2.1). Aussi, la diversité de produits à fournir est telle aujourd'hui qu'un certain nombre de Groupes n'arrivent pas à atteindre une demande permettant d'atteindre le seuil de rentabilité. Cette mécanique est traduite par les nombreux rapprochements de Groupes (PSA et GM, Daimler et l'alliance Renault-Nissan, Fiat et Chrysler, etc.). Les partenariats entre concurrents peuvent prendre la forme de partages d'investissements de conception (partage d'une plateforme par exemple) ou de production (partage d'un site de production par exemple) mais peuvent aussi se traduire par l'achat de composants complexes qui sont souvent des modules (par exemple, Renault et PSA produisent bien plus de moteurs que de véhicules). Lorsque Daimler achète des moteurs développés et produits par Renault, c'est bien une forme d'externalisation de la production et de la conception d'une variante de modules. Cet exemple souligne aussi un aspect non encore évoqué : l'externalisation ne concerne pas nécessairement toutes les variantes d'un module.

La mise en place d'une modularité organisationnelle ne conduit pas nécessairement à court terme à une externalisation de plus en plus de processus. En effet, les investissements passés importants en production et en conception génèrent une inertie particulièrement forte dans le secteur automobile. La mise en place d'une modularité organisationnelle ne se traduit pas à court terme par des démarches d'externalisation massive. D'ailleurs, les exemples cités précédemment concernent essentiellement de nouvelles industrialisations (construction de nouvelles usines et/ou implantations sur un nouveau marché comme les camions Volkswagen au Brésil).

2.3. Rapports inter-firmes dans la Chaîne Logistique automobile

Lorsque la modularité organisationnelle conduit à externaliser la production et potentiellement la conception de modules, les sous-traitants sont responsables d'activités plus complexes

associées généralement à une augmentation de la valeur vendue aux donneurs d'ordres. Un certain nombre de mécanismes permettent d'expliquer l'évolution des rapports inter-firmes liés à la modularité organisationnelle. Une partie de ces mécanismes sont directement liés à la complexification des sous-systèmes achetés qui est inhérente à l'externalisation des activités modulaires.

- Elle conduit à une réduction du nombre de fournisseurs. Par exemple, au lieu d'acheter les 250 composants du moteur à autant de fournisseurs, l'usine approvisionne les variantes de moteurs auprès d'une dizaine de fournisseurs différents.
- Elle conduit aussi à une mise en concurrence des fournisseurs.
 - D'abord, pour définir quel fournisseur deviendra responsable de l'assemblage des modules, c'est-à-dire quel fournisseur restera de rang 1 (Quel fournisseur prendra en charge l'assemblage des moteurs dans l'exemple précédent ? Celui qui usine les culasses ou celui qui usine les pistons etc. ?). Cette compétition tend à favoriser les fournisseurs de rang 1 les plus importants parce qu'ils disposent généralement déjà d'une large compétence et parce qu'ils ont une meilleure capacité à investir pour en acquérir de nouvelles.
 - Ensuite, la définition d'une diversité par variante pour chaque module permet aux donneurs d'ordres de maintenir un état de compétition important entre plusieurs fournisseurs de modules.
- Elle conduit à des partenariats entre sous-traitants voire à des fusions acquisitions. Comme nous l'avons vu dans l'analyse de la littérature, les sous-traitants doivent développer de nouvelles compétences à la fois liées aux produits et au fait qu'ils doivent parfois acheter des composants à d'autres sous-traitants anciennement de rang 1. Pour être toujours en capacité d'innover et de gérer la qualité au meilleur prix de leurs modules, les sous-traitants doivent développer des partenariats à l'instar des donneurs d'ordres.
- Du point de vue du donneur d'ordres, la complexification des sous-systèmes achetés conduit généralement à une asymétrie d'information. Les firmes architectes peuvent ne pas avoir assez de moyens pour investir en recherche dans tous les domaines pour pouvoir continuer à suivre les évolutions technologiques et techniques. L'externalisation de la conception des modules peut donc conduire à des phénomènes de « boîte noire » redoutés en conception.

À l'ordre deux, la complexification des éléments approvisionnés peut alors conduire à un changement dans le rapport de force des entreprises. Il est clair qu'aujourd'hui ce rapport de force n'est pas figé. Par exemple, dans le secteur automobile, la course à la voiture autonome laisse planer l'idée que les firmes architectes, i.e. les constructeurs automobiles ne sont pas nécessairement les mieux placés pour gagner cette course technologique. À plus court terme, si on reprend l'exemple du système multimédia, il est de plus en plus évident que l'usage d'un module APPLE ou GOOGLE devient un argument commercial fort pour les clients finaux. Le rapport de force s'inverse alors en faveur des sous-traitants car le marché impose aux donneurs d'ordres de travailler avec eux. L'accès aux marchés ou du moins la visibilité depuis le client final des sous-traitants semble alors un élément clé dans la définition des rapports de forces entre donneurs d'ordres et sous-traitants.

In fine, il nous semble que l'évolution des rapports inter-firmes dépende de :

- la nature des activités externalisées (de la production et de la conception) ;
- la capacité des firmes architectes à maintenir un niveau de connaissance;
- l'image des firmes sous-traitantes pour le client final ;
- la répartition des marges dans la chaîne logistique (assurant une capacité à investir).

Ce risque d'inversion du rapport de force entre donneurs d'ordres et sous-traitants avec la modularité n'est ni nouveau ni propre à l'industrie automobile. Par exemple, la littérature, dense sur l'analyse de la modularité dans l'industrie informatique, tend à confirmer ce risque. En effet, le rapport de force entre les constructeurs architectes comme IBM ou DELL et les fabricants développeurs de modules comme INTEL et AMD pour les processeurs ou NVIDIA et ATI pour les cartes graphiques semble complètement s'être inversé. D'ailleurs, ce basculement n'est pas seulement le résultat d'un écart d'investissements en R&D mais aussi et peut être surtout d'un développement par ces derniers d'un marketing non plus tourné seulement vers les firmes architectes mais vers le client final consommateur. Ce constat peut aussi être fait dans l'industrie du Vélo (Galvin et Morkel, 2001) avec Shimano par exemple. Sans doute que le secteur automobile en se modularisant aboutira à la même configuration.

Conclusion de la Partie III

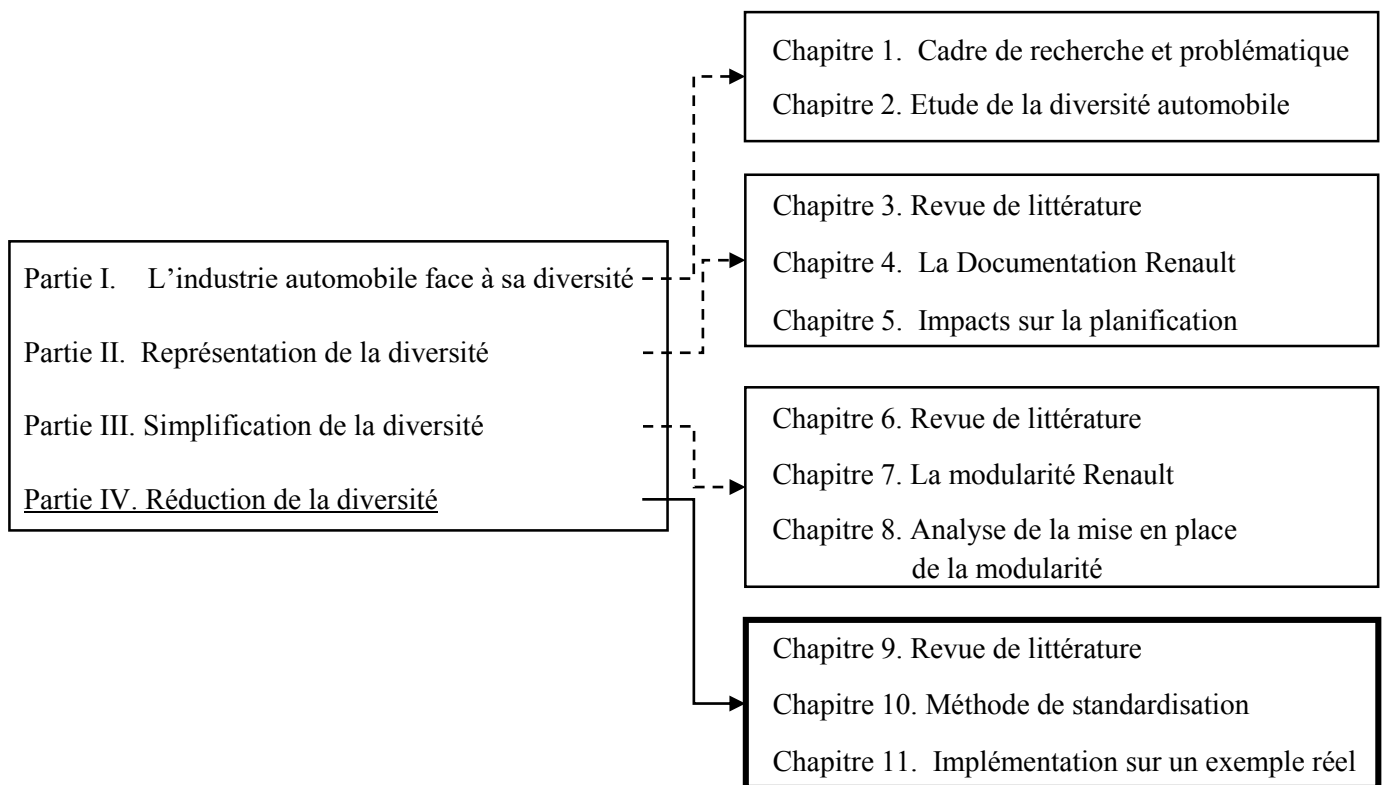
La modularité permet de construire la diversité offerte en produits finis par une combinaison de variantes substituables de quelques sous-systèmes appelés modules. Un module définit donc un périmètre fonctionnel d'un produit, dont la diversité est organisée en variantes substituables. La substituabilité des variantes n'est possible que si l'on conçoit des produits avec moins de contraintes entre les modules ou du moins avec des interfaces les plus standards possibles. La modularité cherche donc à simplifier la diversité.

La conception modulaire d'un produit passe donc par la définition d'un découpage ad hoc du périmètre fonctionnel de chaque module et de la définition d'interfaces standards. La conception modulaire est donc une activité d'architecture. Elle demande une vision systémique du produit. La modularité ne cherche donc pas directement à réduire la diversité mais bien plus à en simplifier la gestion et donc à en minimiser les coûts induits ainsi qu'à réduire les temps de développement des nouveaux produits. Cette approche de conception s'avère intéressante à toutes les phases du cycle de vie du produit. En production notamment, elle peut potentiellement être une source de productivité et de flexibilité permettant à l'entreprise d'être à la fois plus robuste face à la variabilité de la demande et d'améliorer sa rentabilité financière.

L'application de la démarche modulaire sans changement organisationnel ne semble pas permettre de profiter pleinement de la démarche. Chez Renault pour le moment, elle permet d'offrir un cadre d'étude de la diversité par composant permettant une meilleure standardisation des composants. Depuis juin 2013, Renault cherche tout de même à accentuer son ingénierie système. La systémique, entendue comme une façon de penser le produit en combinaison de systèmes, peut peut-être apporter la vision d'architecture qu'il fait encore défaut dans l'approche modulaire du Groupe.

Il semble que les relations inter-firmes dans le secteur automobile restent une question ouverte dans la littérature. Sans trancher le débat, il nous semble que l'automobile peut suivre d'autres secteurs basés depuis plus longtemps sur l'architecture modulaire. Il serait alors intéressant de s'interroger sur la possibilité de voir un jour un nouvel entrant mettre en place une modularité de produits « pure » dans ce secteur. Cette firme serait seulement architecte et n'aurait aucune activité de production comme APPLE dans le secteur électronique.

Partie IV. Réduction de la diversité : la standardisation



Introduction de la Partie IV

Le positionnement concurrentiel d'une entreprise manufacturière se fonde principalement sur la diversité des produits vendus permettant de répondre au besoin particulier de chaque client, ainsi que sur leurs caractéristiques de prix, de qualité et de disponibilité. Le prix de vente dépend du coût, lequel n'est pas indépendant de la diversité, une diversité accrue étant souvent une source d'accroissement des coûts. Dans le but de rester compétitives, les entreprises doivent mettre sous contrôle leur variété. La rationalisation de la conception des produits nouveaux peut permettre d'obtenir à moindre coût la diversité souhaitée par le client final (visible au travers d'un configurateur par exemple).

La **standardisation** est un processus visant à rationaliser la composition d'un ensemble de composants de caractéristiques différentes appelés à satisfaire un ensemble de besoins de nature similaire (Tarondeau 1998, Rutenberg 1971, Fisher *et al.* 1999, Dupont et Cormier 2001, Perera *et al.* 1999, Baud-Lavigne *et al.* 2012, Fouque 1997, etc.). Pour rester homogène avec les dénominations introduites dans les parties précédentes, on gardera les termes de composants alternatifs (CAs) et d'ensembles de composants alternatifs (ECAs). En général, au moment où ce processus est activé, un ECA existe déjà et peut être complété par un ensemble de composants à l'étude ou susceptibles de l'être. Les caractéristiques fonctionnelles possédées par ces composants alternatifs sont de même nature que celles définissant les besoins auxquels des demandes sont associées. Cet effort de rationalisation a généralement pour conséquence de limiter le nombre de composants et de réduire les coûts supportés pour répondre aux besoins à satisfaire. La standardisation est donc un processus majeur de l'amélioration de la compétitivité des entreprises, et plus particulièrement celle de la production de masse. En pratique, la combinaison de composants alternatifs d'ECAs différents est contrainte par des restrictions techniques qui rendent non optimaux les modèles standardisant un seul ECA. Ces restrictions peuvent parfois être levées par l'utilisation de composants dits de jonction permettant de résoudre le problème d'interfaçage entre deux composants alternatifs.

Les **modules** peuvent être vus dans cette partie comme des composants particuliers, combinant des composants alternatifs élémentaires appartenant à différents ECAs. Ces modules peuvent avoir une existence physique et être acheminés vers une usine d'assemblage, ou une existence virtuelle et voir le jour sur cette ligne. La standardisation peut donc intervenir au niveau des modules, des Modules Alternatifs (MAs) étant à choisir dans un Ensemble de Modules Alternatifs (EMA). Les modules répondent à différents **besoins** que l'on peut définir par des

combinaisons de **prestations alternatives** (PAs). Pour rappel, les PAs représentent la diversité des combinaisons de fonctions offertes au client au travers d'un configurateur Web par exemple (cf. Partie II Chapitre 4 §1). L'ensemble de ces besoins doit être couvert par l'ensemble considéré des modules alternatifs.

Un même composant alternatif peut être monté dans plusieurs modules alternatifs, conduisant à une **commonalité**, susceptible d'engendrer des économies d'échelle intéressantes. Dans ce contexte, la standardisation doit être menée conjointement au niveau des modules et au niveau des composants qu'ils comportent, étant entendu que les demandes des composants alternatifs sont tirées par celles des modules alternatifs retenus. Cet aspect est d'autant plus intéressant que les prévisions de demande ne peuvent s'effectuer qu'à un niveau agrégé et que, dans la perspective retenue ici, le choix des modules alternatifs et la détermination de leurs nomenclatures restent à définir. L'optimisation de la standardisation conjointe d'un ensemble de MA et de tous les ensembles de CAs qu'il inclut est le premier apport de notre approche. Un second apport se situe au niveau des coûts en jeu dans cet arbitrage, on montrera notamment comment ils peuvent tenir compte des dimensions temporelles et spatiales du problème.

Nous commencerons par une analyse des écrits disponibles sur la standardisation après en avoir délimité le périmètre (chapitre 9), ce qui permettra d'identifier quelques lacunes que nous nous proposons de combler. En continuité des articles analysés, nous présenterons la modélisation proposée et qui permet de traiter le problème de standardisation conjointe des modules alternatifs et de leurs composants alternatifs (chapitre 10). Nous terminerons (chapitre 11) par une application de la démarche proposée à un cas industriel réel de grande taille (données et résultats téléchargeables).

Chapitre 9. Revue de littérature

Cette partie étant orientée vers la modélisation de la standardisation, nous nous sommes focalisés sur les écrits proposant des méthodes prescriptives visant à réduire la diversité (§2). Quelques articles descriptifs, centrés sur les méthodes de gestion de la diversité, seront quand même analysés pour pouvoir traiter la définition fonctionnelle progressive des besoins, des modules alternatifs puis des composants alternatifs (§1).

1. Les approches descriptives de standardisation

La rationalisation de la diversité de composants alternatifs d'un ECA passe nécessairement par l'explicitation d'une liste de besoins associés. Les besoins comme les modules alternatifs se définissent par des niveaux de performance voulus ou atteints pour différentes fonctions (Fisher *et al.* 1999 ; Martin et Ishii, 2002 ; Fonte 1994 ; Sered et Reich 2006). Dès lors, la standardisation nécessite, en amont de l'optimisation, une analyse fonctionnelle (Martin et Ishii 2002 ; Fonte 1994 ; Sered et Reich 2006). Cette étape de la standardisation est trop souvent ignorée des travaux purement prescriptifs qui font généralement l'hypothèse de l'utilisation d'une seule fonction (Renard 1877 ; Fisher *et al.* 1999 ; Lamothe *et al.* 2006, etc.). Cette analyse fonctionnelle peut être faite en phase de conception d'une famille entière de produits (Martin et Ishii 2002, Lamothe *et al.* 2006) ou en phase de conception d'un nouveau produit (Fisher *et al.*, 1999) ou, encore, en phase de production pour réduire la diversité (Renard, 1877). La prise en compte des besoins futurs est possible en phase de conception (Martin et Ishii, 2002). Martin et Ishii (2002) proposent une méthode d'analyse fonctionnelle basée sur les matrices QFD (*Quality Function Development*). Ils cherchent à faire une étude de sensibilité et d'interdépendance des fonctions pour différencier celles qui pourront donner lieu soit à des composants standards soit à des composants alternatifs (interface standard mais diversité de prestations, c'est une forme de modularité) soit enfin à des composants autres.

Perera *et al.* (1999) distinguent trois cas de standardisation en fonction du périmètre retenu :

- standardisation au sein d'un produit : plusieurs composants d'un même produit sont remplacés par un composant réutilisé n fois (ex : moteurs électriques) ;
- standardisation au sein d'une gamme : plusieurs composants utilisés chacun dans des produits différents sont remplacés par un composant commun aux n produits (ex : système de climatisation) ;

- standardisation dans le temps : le produit de prochaine génération possédera des composants des produits de la génération présente.

Ils cherchent à étudier les effets de la standardisation sur les coûts tout au long du cycle de vie en fonction de ces périmètres. Ils considèrent que l'augmentation de la commonalité induite par la standardisation génère des gains dans les coûts fixes et récurrents de chaque étape du cycle de vie, de la conception au recyclage. Ils identifient aussi un certain nombre de surcoûts comme l'augmentation du prix d'achat client pour certaines prestations alternatives, l'augmentation des frais de fonctionnement pour l'utilisateur sur le produit dont le composant est plus performant que nécessaire. Cet article propose une liste très pertinente des coûts à prendre en compte dans les démarches de standardisation.

Par la suite, nous focaliserons l'analyse de la littérature sur les travaux prescriptifs traitant de la standardisation de composants ou de modules ou des deux. Notre définition des modules est compatible avec celles trouvées dans la littérature de référence (Ulrich 1995 ; Sanchez et Mahoney 1996 ; Baldwin et Clark 1997 ; Dahmus *et al.* 2001, Salvador *et al.* 2002, etc.) mais le problème étudié n'est pas ici celui de la définition d'une architecture modulaire, comme nous l'avons fait dans la Partie III. Nous nous positionnerons ici dans le second aspect de la modularité présenté Partie III Chapitre 6 §1.1, en nous focalisant sur la définition de la diversité de modules alternatifs pertinente pour un EMA donné.

2. Les approches prescriptives de standardisation

Les articles traitant de manière prescriptive de l'optimisation de la diversité peuvent se rattacher à deux familles de problématiques : celle de la définition de modules permettant une différenciation retardée optimale ou celle d'une meilleure définition de composants standards (§2.1). Sans aucun doute, notre démarche s'inscrit dans le second courant que l'on analysera plus en détail au §2.2. Nous mettrons enfin en évidence un certain nombre de différences entre les approches prescriptives trouvées dans la littérature (§2.3), ce qui permettra de positionner clairement notre apport. Un tableau de synthèse regroupant nos principales observations est proposé à la fin de cette analyse de littérature.

2.1. Deux types d'approches prescriptives

L'analyse de la littérature met en évidence la coexistence de deux grandes problématiques :

- Dans le courant des travaux s'intéressant à la différenciation retardée, l'ensemble des composants alternatifs sont connus, la question est de savoir quelle diversité optimale

de modules alternatifs (vus comme des assemblages de composants) doit être gérée (Swaminathan et Tayur 1998 ; Agard et Tollenaere 2002 ; Rai et Allada 2003, Agard et Penz 2009, Baud-Lavigne *et al.* 2012, Agard et Bassetto 2013). Les besoins sont directement des produits finis et la liste des composants de plus bas niveau constituant chacun d'eux (i.e. la nomenclature) est connue. Cette liste prédéterminée ne peut être changée ce qui empêche l'usage de composants meilleurs que nécessaire. Le but de ces démarches est alors de définir le niveau d'assemblage intermédiaire à stocker en prenant un paramètre à optimiser comme la qualité (Rai et Allada 2003 ; Agard et Bassetto 2013) ou le temps d'assemblage (Agard et Penz, 2009), plus que les coûts. Dans la plupart de ces articles, la définition des volumes de demande par besoins, nécessaire à l'optimisation économique, est arbitraire sinon absente. Dans cette classe de problèmes, la composition des ECAs utilisés pour constituer des modules est donc prédéterminée et n'est pas susceptible d'être modifiée par l'introduction de nouveaux CAs. Cette perspective est éloignée des préoccupations de standardisation multi-niveaux sur lesquelles cette Partie est centrée.

- Le second courant poursuivant les travaux fondateurs de Renard (1877) part d'un ensemble de besoins et d'un ensemble de composants susceptibles de les satisfaire. La question est de déterminer la diversité à coût minimal de cet ensemble, qui doit être utilisée et donc produite (Rutenberg 1971, Dupont et Cormier 2001, Fisher *et al.* 1999, Lamothe *et al.* 2006, Giard 1999, 2001, Chatras et Giard 2014, 2015c). Ce questionnement peut alors intervenir à n'importe quelle phase du cycle de vie d'un produit ou d'une famille de produits. Ici, de façon claire, l'objectif est de trouver le meilleur compromis entre le coût d'une diversité trop importante de solutions adaptées précisément à la variété des besoins et le coût d'une solution sur-performante appliquée à tous les besoins. Cette démarche est celle qui correspond à notre définition de la standardisation telle que proposée en introduction.

2.2. Description des principales approches prescriptives de standardisation de composants

Il est couramment admis que Renard (1877) est à l'origine d'une approche rationnelle de la standardisation. Sa présentation s'impose d'autant plus qu'un certain nombre de travaux récents s'inscrivent dans cette filiation. On présentera ensuite plus en détail les travaux de Giard (1999,

2002) puis de Lamothe *et al.* (2006) qui présentent chacun des avancées significatives dans les problèmes de standardisation.

Renard (1877) semble être le premier à avoir rationalisé la diminution du nombre de CAs nécessaires pour faire face à une demande variée. Une seule caractéristique fonctionnelle f est prise en compte pour spécifier le besoin à satisfaire par un CA et une seule caractéristique technique q du CA est prise en compte ; dans le cas étudié par Renard, q est un diamètre de câble et f est la traction maximale avant rupture pouvant être supportée par ce câble. Une étude expérimentale permet d'établir que f est une fonction monotone croissante de q . Renard propose de définir arbitrairement la variété, c'est-à-dire le nombre de CAs, en effectuant une partition de l'étendue des valeurs possibles de f en un nombre prédéterminé de plages dont les bornes supérieures sont en croissance géométrique.

Cela passe alors par la définition de « paliers » de besoins plus large pour chaque variante, qui devront alors nécessairement être basés sur le besoin le plus exigeant. Le graphe suivant représente bien ce concept, la courbe en bleu représente l'évolution progressive du besoin représenté par un critère ; tandis que la courbe escalier en rouge représente les choix de paliers de niveau de performance. Remarquons que la standardisation est d'autant plus forte que le nombre de paliers est faible. Le corollaire est de dire que la standardisation est d'autant plus forte que la « largeur des paliers » (i.e. la couverture de besoins par chaque variante retenue) est importante. Dans cet exemple théorique, les cinq variantes choisies pour couvrir les quarante-huit besoins n'ont pas tous le même degré de commonalité.

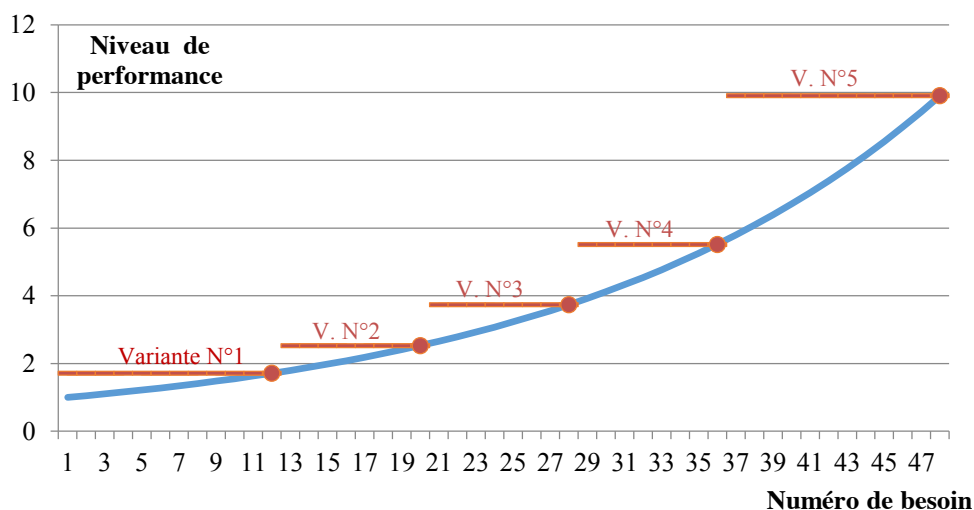


Figure 34 : Exemple de "paliers" de la standardisation

Trois reproches peuvent être formulés à l'encontre de cette approche qui perdure avec un certain nombre de normes ISO : elle n'utilise qu'une seule caractéristique fonctionnelle de nature continue ; le nombre optimal de CAs n'a pas de raison d'être prédéterminé ; aucun arbitrage économique n'intervient pour définir ce nombre de plages et leurs bornes, puisque cette approche ne prend pas en compte ni la demande ni les coûts. Si on prend le graphique ci-dessous représentant la distribution du volume en fonction des besoins, la commonalité d'une variante doit être l'air sous la courbe et non le segment de besoins qu'elle couvre.

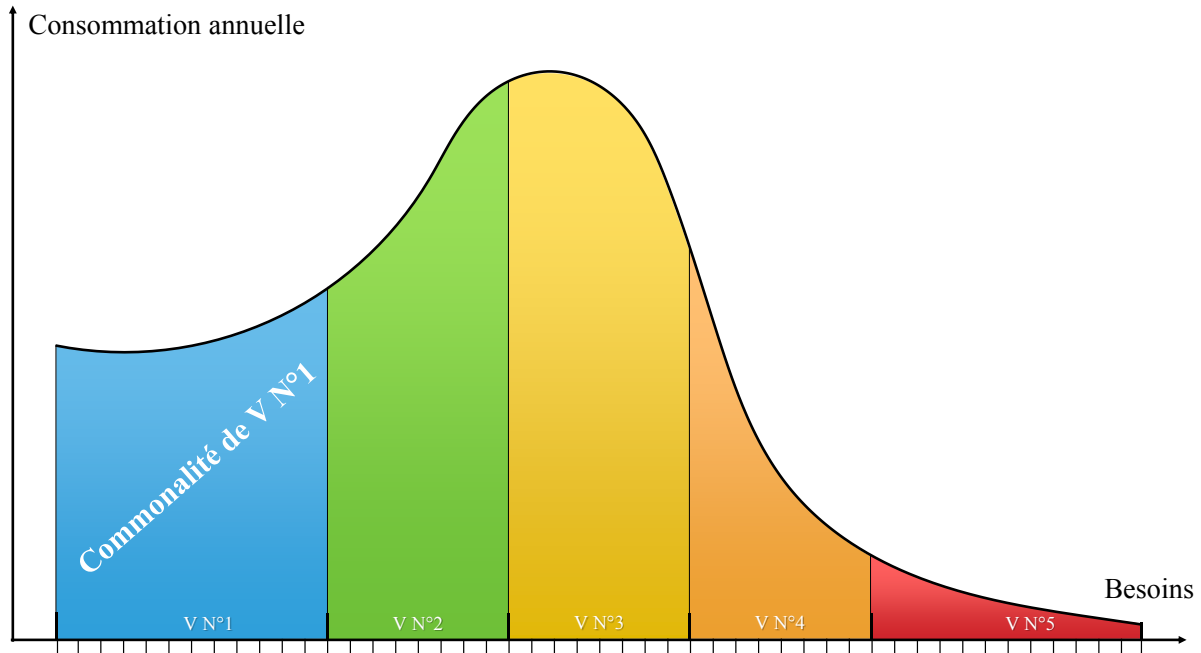


Figure 35 : Exemple de l'importance des volumes de consommation en standardisation

Fisher *et al.* (1999) enrichissent l'approche de Renard en retenant une définition économique du nombre optimal de composants au prix d'hypothèses simplificatrices fortes. Les autres travaux ne dissocient pas la question de la définition du nombre optimal de variantes et le choix de ces variantes. La limite principale des travaux de Rutenberg (1971) et de Dupont et Cormier (2001), qui s'inspirent de la théorie des graphes et des modèles recherchant le plus court chemin, réside dans le fait qu'ils ne définissent pas de besoins mais directement des produits finis. Cet angle d'attaque présente deux inconvénients majeurs. D'abord, la diversité des besoins peut être trop élevée en pratique, enfin, il est nécessaire pour chacun de ces produits finis d'établir l'ensemble des nomenclatures potentielles permettant de les obtenir.

Une prise en compte explicite de plusieurs caractéristiques fonctionnelles et d'un arbitrage économique est proposée par Giard (1999, 2002) et mise en application sur un cas réel par Chatras et Giard (2014, 2015c). Les caractéristiques retenues peuvent être quantitatives (poids, puissance...) ou qualitatives (rattachement ou non à une norme...). Un tableau R croisant les

CAs ($c = 1..C$) et les caractéristiques fonctionnelles ($f = 1..F$) de ces CAs peut être établi. Ces CAs peuvent être déjà existants ou à l'étude. L'élément R_{fc} peut alors correspondre à une valeur numérique ou à un attribut qualitatif (cf. premier tableau des Tableaux 15). L'inclusion de CAs à l'étude est liée à une perception de besoins à venir, susceptible de conditionner le bien-fondé des conclusions du processus de sélection. Ils considèrent dans cet article qu'un besoin est directement satisfait par un CA, puisqu'il n'y a qu'un seul niveau de nomenclature. À chaque besoin p ($p = 1..P$) est associée une demande d_p , ces besoins effectuant une partition de la demande. En l'absence de contraintes de production, un besoin est satisfait par un seul CA, car on a intérêt à faire appel au CA le moins cher pour satisfaire un besoin et que tout panachage coûterait plus cher. Par contre, un CA peut satisfaire plusieurs besoins. L'analyse de ces besoins fait appel aux mêmes caractéristiques fonctionnelles que celles des CAs. Les caractéristiques quantitatives se définissent par des plages de valeurs et les caractéristiques qualitatives, par une liste d'attributs acceptables. Le tableau S décrit ($\rightarrow S_{pf}$) les conditions d'éligibilité d'un CA. La fonction de coûts proposée par Giard (1999, 2002) dans cette formulation du problème est une fonction monotone croissante, affine par morceaux, ce qui permet d'inclure des coûts fixes liés aux études et investissements associés au lancement de nouveaux CAs à l'étude. Elle inclut également des effets possibles de synergie positive ou négative induits par la production de plusieurs CAs sur un même site.

Tableaux 15 : Exemple de définition fonctionnelle de 10 MAs, 14 besoins et la matrice de Booléens résultant du croisement de ces définitions

R _{fc}		Caractéristiques fonctionnelles					S _{pf}		Caractéristiques fonctionnelles requises					Demande (10 ⁵)	A _{cp}		Composants Alternatifs (CA)														
									f=1 Puissance (hp DIN)	f=2 Clim. 1:man. 2:auto.	f=3 CO ₂ (g/km)	f=4 Poids (kg)	f=F=5 Euro.X				f=1 Puissance (hp DIN)	f=2 Clim. 1:man. 2:auto.	f=3 CO ₂ (g/km)	f=4 Poids (kg)	f=F=5 Euro.X	c=1	c=2	c=3	c=4	c=5	c=6	c=7	c=8	c=9	c=C = 10
									p=1	≥ 65	1	≤ 92	≤ 163				≥ 5	60	p=1	1		1									
Composants Alternatifs (CA)	c=1	75	1	90	160	5	Besoins	p=2	≥ 80	1	≤ 107	≤ 160	≥ 4	40	Besoins	p=2		1	1												
	c=2	90	1	105	160	5		p=3	≥ 90	1	≤ 108	≤ 171	≥ 5	20		p=3		1	1												
	c=3	90	1	90	160	6		p=4	≥ 90	1	≤ 93	≤ 160	≥ 6	20		p=4			1												
	c=4	110	1	110	170	5		p=5	≥ 90	1	≤ 104	≤ 170	≥ 6	90		p=5			1												
	c=5	110	2	110	170	5		p=6	≥ 105	1	≤ 115	≤ 175	≥ 5	52		p=6				1	1	1									
	c=6	120	2	110	170	5		p=7	≥ 110	1	≤ 110	≤ 186	≥ 5	49		p=7				1	1	1									
	c=7	130	1	120	200	5		p=8	≥ 110	2	≤ 135	≤ 200	≥ 4	8		p=8					1	1					1				
	c=8	150	1	160	180	5		p=9	≥ 115	1	≤ 143	≤ 185	≥ 4	40		p=9						1					1				
	c=9	130	2	140	200	5		p=10	≥ 115	1	≤ 125	≤ 205	≥ 5	12		p=10						1	1				1				
	c=C=10	130	2	120	170	6		p=11	≥ 130	1	≤ 150	≤ 200	≥ 5	5		p=11							1			1	1				
								p=12	≥ 150	1	≤ 160	≤ 180	≥ 4	92		p=12								1							
								p=13	≥ 130	2	≤ 185	≤ 220	≥ 4	26		p=13										1	1				
								p=P=14	≥ 130	1	≤ 125	≤ 170	≥ 6	2		p=P=14												1			

Lamothe *et al.* (2006) se sont penchés sur la conception d'une nouvelle famille de produits. Ils se positionnent très tôt dans la phase de conception et partent du postulat qu'il est optimal

économiquement de synchroniser la conception de la famille de produit et celle de la chaîne logistique. Ils partent du principe que d'abord, les concepteurs de la famille de produits proposent différentes solutions techniques qui se traduisent par des nomenclatures et qu'ensuite, c'est en construisant la chaîne logistique de la famille que l'on choisit de façon optimale les solutions. Ils définissent les besoins par un niveau de performance minimal souhaité pour n fonctions et supposent que les besoins comme les produits sont ordonnés de façon croissante, ce qui souligne l'usage d'une fonction de synthèse regroupant par une unique fonction l'ensemble des fonctions définissant les CAs. Ceci est intimement lié à la définition de segments de marché car l'hypothèse implicite est qu'un client sera forcément satisfait d'être « surclassé ». Ceci peut être difficilement acceptable lorsqu'il y a un coût d'usage (entretien, consommation énergétique...) ou des fonctions antagonistes non négligeables (poids ou encombrement et puissance par exemple). Dans le cas d'une relation B2B (*Business to Business*) c'est encore plus discutable car l'entreprise cliente voit l'excès de fonctionnalités comme une source de coûts et de sur-qualité inutile. Ils supposent que les produits sont le résultat d'un assemblage de composants gérés par variante. La demande est exprimée sous forme de PBOM (*Planning Bill Of Material*) sur les segments de marché, puis sur les combinaisons de niveaux de prestations, ce qui suppose une connaissance fine de la demande. Une fois toutes les solutions techniques définies par leur nomenclature et leur PBOM, ils utilisent un programme linéaire (*Mixed-integer linear program*) pour faire le choix et définir la chaîne logistique optimale.

Ces approches souffrent cependant de trois limitations importantes que l'on cherchera à lever dans le Chapitre 10 §1.2 : d'abord l'usage des nomenclatures pré-définies supprime la définition des ECAs ; les ECAs sont alors supposés indépendants, ce qui n'est guère réaliste (Chatras et Giard 2014) ; ensuite définir les besoins, et donc les demandes à la maille des composants est très difficile en pratique ; enfin, ces approches ignorent largement la complexité réelle des composantes spatiales (chaîne logistique) et temporelles (évolution des demandes et lancement éventuel de nouveaux composants) dans la fonction de coûts.

2.3. Différences d'hypothèse entre ces approches

La définition d'un ECA est parfois absente (Rutenberg 1971, Dupont et Cormier 2001, Lamothe *et al.* 2006). Cela s'explique souvent par le fait que les auteurs supposent les nomenclatures connues. De plus ces auteurs ne définissent pas les fonctions caractérisant les besoins ou les CAs. Lorsque l'ECA est explicite, il est défini soit par une seule fonction (Renard 1877, Fisher

et al. 1999) soit par plusieurs (Giard 1999, 2001). D'un point de vue opérationnel, il est clair que la définition d'un composant par plusieurs fonctions est à la fois plus pratique en termes d'analyse, mais aussi plus objectif en termes de définition des données d'entrée du modèle d'optimisation, en évitant le recours à une fonction de synthèse.

Dans les différents travaux que nous avons trouvés traitant de la standardisation telle que nous la définissons, certains chercheurs veulent standardiser simultanément plusieurs ECAs interdépendants (Rutenberg 1971, Dupont et Cormier 2001, Lamothe *et al.* 2006). À l'exception de Lamothe *et al.* (2006), leurs approches nécessitent la détermination de toutes les combinaisons autorisées, ce que nous évitons. Par ailleurs, aucun des articles ne propose l'usage de composants de jonction additionnels permettant de lever certaines de ces restrictions au prix d'un léger surcoût.

La détermination de la demande par composant alternatif est l'un des enjeux majeurs de la modélisation car la solution en dépend fortement (Fisher *et al.* 1999, Baud-Lavigne *et al.* 2012). Les démarches, ne prenant pas en compte la demande dans la fonction objectif, ne peuvent donc pas être pertinentes d'un point de vue économique (Renard 1877, Agard et Tollenaere 2002, Agard et Penz 2009). Les autres auteurs postulent un volume ou un pourcentage par besoin. Notre modèle permet d'améliorer la définition de la demande utilisée dans l'analyse économique de trois façons principales. Tout d'abord, il apporte une cohérence des demandes à satisfaire par les MAs et les CAs sans faire appel à une nomenclature prédéterminée, la nomenclature étant un résultat de l'optimisation. Ensuite, l'usage de modules permet de définir des besoins plus agrégés autorisant alors de passer sur une maille de prévisions du type de celles faites en pratique par la Direction Commerciale. Enfin, il permet de prendre en compte une dynamique de la demande liée à un cycle de vie ou à l'introduction dans le futur de PAs nouvelles.

La prise en compte du temps dans ce type de décision est mentionnée comme une piste importante d'amélioration par Fisher *et al.* (1999), pourtant aucun article ne semble véritablement traiter le problème. Cette prise en compte doit non seulement permettre de modéliser l'évolution de la demande des besoins actuels comme dans l'article de Lamothe *et al.* (2006), mais aussi l'apparition de nouveaux besoins, le délai de mise à disposition de composants nouveaux et la gestion des déphasages des cycles de vie de l'ensemble des produits d'une gamme. On ne développe généralement pas tous les produits (ou les familles de produits) d'une gamme en même temps. Notre modélisation propose une solution efficace pour traiter ce problème.

La prise en compte des questions de localisation de chaîne logistique peut se faire de deux façons, soit en traitant séquentiellement les questions de conception de la chaîne de production et d'optimisation de la diversité, soit en traitant simultanément les deux questions. Certains chercheurs ont essayé de montrer la supériorité de l'approche simultanée (Lamothe *et al.* 2006, Baud-Lavigne *et al.* 2012). Il n'est pas inutile de lister les questions posées par la conception de chaîne logistique car pour nous, elles ne peuvent pas toutes être traitées avec le même horizon temporel. Trois composantes doivent être prises en compte dans les chaînes logistiques de grande dimension.

- *Détermination des usines d'assemblage final et des marchés* qui leur sont rattachés. Cette question est d'ordre stratégique, elle repose sur des critères macroéconomiques (droit du travail, accords politiques, imposition, douane...) et, de plus en plus, sur la mise en concurrence des sites de production d'un même Groupe. Cette décision, prise avant même que la conception d'une nouvelle famille de produits ne débute, ne semble pas pouvoir être remise en cause pour les constructeurs automobiles par une optimisation de la standardisation. Nous la considérerons donc comme acquise dans notre proposition.
- *Détermination des sites fournisseurs* qui produiront les composants. Cette question est souvent gérée par des contrats. Classiquement, dans le secteur automobile qui est au cœur de nos préoccupations, ces contrats sont généralement conclus pour au moins trois ans. La standardisation de composants doit donc tenir compte des durées de contrats, ou d'éventuelles pénalités financières de rupture de contrat. La prise en compte de ces contraintes est possible dans le cadre de l'approche que nous proposons dans cette Partie.
- *Détermination des incoterms et des itinéraires* d'approvisionnement de ces composants. Cette détermination est importante aussi car on peut imaginer une production délocalisée avec un stock de proximité du fournisseur proche de l'usine qui sera alors considéré comme le site « livreur ». La dernière question, bien qu'inscrite dans le contrat avec le fournisseur, peut faire l'objet de négociation pendant la durée d'engagement.

Enfin, aucun article n'envisage simultanément la standardisation sur deux niveaux de nomenclature pour traiter globalement la diversité d'un EMAs et des ECAs que ces modules intègrent, première étape d'une approche pouvant aller au-delà de deux niveaux. Notre démarche vise à compléter aussi cette lacune dans une modélisation intégrant de manière plus

directe et facile pour les opérationnels, l'ensemble des contraintes techniques et les composants de jonction permettant de lever certaines d'entre elles.

Le tableau ci-dessous synthétise cette analyse de la littérature en positionnant les articles majeurs étudiés au regard de critères propres à notre sujet de recherche. La dernière ligne de ce tableau correspond à notre proposition et permet de faire ressortir l'apport de notre démarche.

Tableau 16 : Synthèse de l'analyse de littérature

Auteurs	Année	Prescriptif ou descriptif	Analyse fonctionnelle	Standardisation de composants	Définition de modules	Définition de la chaîne logistique	Positionnement dans le cycle de vie	Forme d'expression des besoins	Maille de définition des besoins	Nbre de niveaux de nomenclature	Nbre de fonctions par CA	Nbre d'ECAs	Modélisation économique	Type de modélisation des coûts	Contraintes	Prise en compte du volume de demande	Modélisation dynamique
Fonte	1994	descriptif	X	X			conception de famille de produits nouveaux	niveau de prestations par fonction	précis, issu d'un cahier des charges de conception	1	n	n	-	-	-	-	-
Martin et Ishii	2002	descriptif	X	X	X		conception de famille de produits nouveaux	niveau de prestations par fonction	exprimable par le commerce	1	n	n	-	-	-	ratio par besoin	-
Sered et Reich	2006	descriptif	X	X			conception de produits nouveaux	niveau de prestations par fonction	exprimable par le commerce	1	n	n	-	-	-	-	-
Perera et al.	1999	descriptif	X	X			tous	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Swaminathan et Tayur	1998	prescriptif			X		vie série, production	produits finis	liste des composants de plus bas niveau	1	1	n	oui	fonction affine	temps d'assemblage	non équiprobable	non
Agard Tollenaere	2002	prescriptif			X		vie série, production	produits finis	liste des composants de plus bas niveau	1	1	n	oui	coût fixe seul	temps d'assemblage	non équiprobable	non
Agard et Penz	2009	prescriptif			X		vie série, production	produits finis	liste des composants de plus bas niveau	1	1	n	oui	fonction linéaire	temps d'assemblage	non	non
Baud Lavigne et al.	2012	prescriptif			X	X	conception de produits nouveaux	produits finis	liste des composants de plus bas niveau	2	1	n	oui	fonction affine	-	c'est une variable	non
Agard et Bassetto	2013	prescriptif			X	X	conception de produits nouveaux	produits finis	liste des composants de plus bas niveau	2	1	n	oui	proportionnel à la quantité	temps d'assemblage et qualité	oui supposé connu par produit fini	non
Renard	1877	prescriptif		X			vie série, production	niveau de prestations par fonction	précis, issu d'un cahier des charges de conception	1	1	1	non	non	-	non	non
Fisher et al.	1999	descriptif & prescriptif		X			conception de famille de produits nouveaux	niveau de prestations par fonction	précis, issu d'un cahier des charges de conception	1	1	1	oui mais que pour définir le nombre optimal de CAs	fonction affine	-	oui supposé connu par besoin	non
Rutenberg	1969	prescriptif		X			conception de famille de produits nouveaux	produits finis	liste des composants de plus bas niveau	1	1	n	oui	fonction affine	restriction à la libre combinaison des CAs	oui supposé connu par besoin	non
Dupont et Cormier	2001	prescriptif		X			conception de famille de produits nouveaux	produits finis	liste des composants de plus bas niveau	1	1	n	oui	fonction concave	restriction à la libre combinaison des CAs	oui supposé connu par besoin	non
Giard	1999, 2001	prescriptif	X	X			conception de famille de produits nouveaux	niveau de prestations par fonction	précis, issu d'un cahier des charges de conception	1	n	1	oui	fonction affine par morceaux + synergies	restriction à la libre combinaison des CAs	volume par besoin	non
Lamothe et al.	2006	prescriptif		X	X	X	conception de famille de produits nouveaux	niveau de prestations par fonction	exprimable par le commerce	1	1	n	oui	fonction affine	restriction à la libre combinaison des CAs	volume par besoin + hypothèse de coefficient de PBOM	oui
notre proposition	2015	prescriptif	X	X	X	(possible)	conception de famille de produits nouveaux	niveau de prestations par fonction	combinaisons de PAs => exprimable par le commerce	2	n	n	oui	fonction affine par morceaux + synergies	restriction à la libre combinaison des CAs	volume par besoin + utilisation de la nomenclature	oui

Chapitre 10. Standardisation simultanée des modules et de leurs composants

L'originalité de notre approche repose sur une approche économique élargie visant à sélectionner simultanément les modules alternatifs et les composants alternatifs qu'ils comportent afin de répondre à un ensemble de besoins, sans nomenclature prédéterminée et en intégrant la possibilité d'utiliser des composants de jonction pour lever, si cela est possible, l'interdiction de couplage de deux CAs appartenant à deux ECAs différents. Nous en expliquerons la logique générale (§1.1) avant de formaliser ce problème décisionnel par un programme linéaire. Le modèle de base introduit par Chatras et Giard (2015c) est décrit au §1.2 afin de bien comprendre les améliorations qui en seront faites au §2. Nous verrons donc ensuite comment intégrer les aspects temporels et spatiaux de ce problème dans la définition des coefficients de la fonction objectif (§2.1). On terminera par l'analyse de la prise en compte de la non-linéarité possible de certains coûts intervenant dans la fonction objectif (§2.2) et de contraintes additionnelles qui peuvent être indispensables à ajouter dans le traitement de problèmes réels (§2.3). L'ensemble des notations utilisées dans cette modélisation est donné au §3.

1. Description du modèle d'optimisation

1.1. Description du problème décisionnel

Notre objectif est de définir la diversité économiquement optimale d'un ensemble de modules alternatifs et de plusieurs ensembles de composants alternatifs mobilisés dans la fabrication des MAs. Notre modèle repose sur une définition multidimensionnelle des caractéristiques fonctionnelles des besoins et des CAs (comme Giard 1999 et 2002 l'avait introduit, cf. Chapitre 9 §2.2). Comme dans tous les articles prescriptifs traitant de la standardisation, la définition de la diversité optimale de ces CAs se fait au regard des besoins. Les CAs, comme les besoins, sont définis par des caractéristiques fonctionnelles.

Comme nous l'avons vu dans la Partie III, dans le cadre d'une approche de conception, la définition fonctionnelle d'un système complexe se fait progressivement à partir d'une définition fonctionnelle commerciale et par décomposition jusqu'à atteindre un niveau de fonction élémentaire alors facilement traduisible en définitions techniques et organiques c'est-à-dire en composants (Pahl et Beitz 1996, Albano et Suh 1994). Les besoins ne peuvent donc pas être

définis à une autre maille que celle agrégée de la définition fonctionnelle explicite pour le commerce. En effet, seule la Direction Commerciale est à même de proposer des prévisions fiables des demandes nécessaires à une analyse économique (Chatras *et al.* 2015a, 2015b). Une des limites importantes des démarches évoquées dans l'analyse de la littérature réside dans l'inadéquation entre la maille de définition d'un besoin suffisamment agrégé pour faire des prévisions de volume de demandes fiables et, d'autre part, la maille de définition d'un CA. Notre apport sur ce point est alors de reprendre la démarche classique plus progressive en introduisant au moins un niveau intermédiaire de définition fonctionnelle entre les besoins et les CAs. Dans notre modélisation, nous traiterons le cas d'un niveau supplémentaire qui apparaît comme une première étape vers une démarche plus générale : nous faisons l'hypothèse que ce niveau fonctionnel peut aussi être transcrit en définition technique aboutissant à la spécification de MAs. Les modules alternatifs ne sont alors pas ici définis par l'indépendance des fonctions ni par leur interfaces puisque nous travaillons un seul ensemble de modules alternatifs à la fois. Notre travail est donc plus dans la lignée des travaux de configuration de modules que dans les travaux de définition (i.e. de conception) de modules basés généralement sur les matrices DSM (cf. Partie III Chapitre 6 §1.1). Notre apport est aussi de ne pas supposer connue une nomenclature (liste arborescente de MAs composés d'un CA dans chaque ECA) mais bien de la définir en optimisant simultanément la diversité des CAs et des MAs.

La [Figure 36](#) ci-dessous illustre le lien entre les besoins, les MAs et les ECAs sur l'exemple réel du système de refroidissement du moteur d'un véhicule. Cet exemple fera l'objet du cas industriel développé en Chapitre 11 §2.1. Pour plus de clarté, la forme est restée assez similaire à celle utilisée en Partie II pour montrer l'architecture de la représentation de la diversité. Il est intéressant en faisant ce parallèle avec la [Figure 21](#) de noter l'apparition dans cette partie d'un niveau de nomenclature supplémentaire. L'introduction de MAs ne pose en pratique pas de problème car elle est en accord avec les définitions classiques des modules données dans la troisième partie de cette thèse.

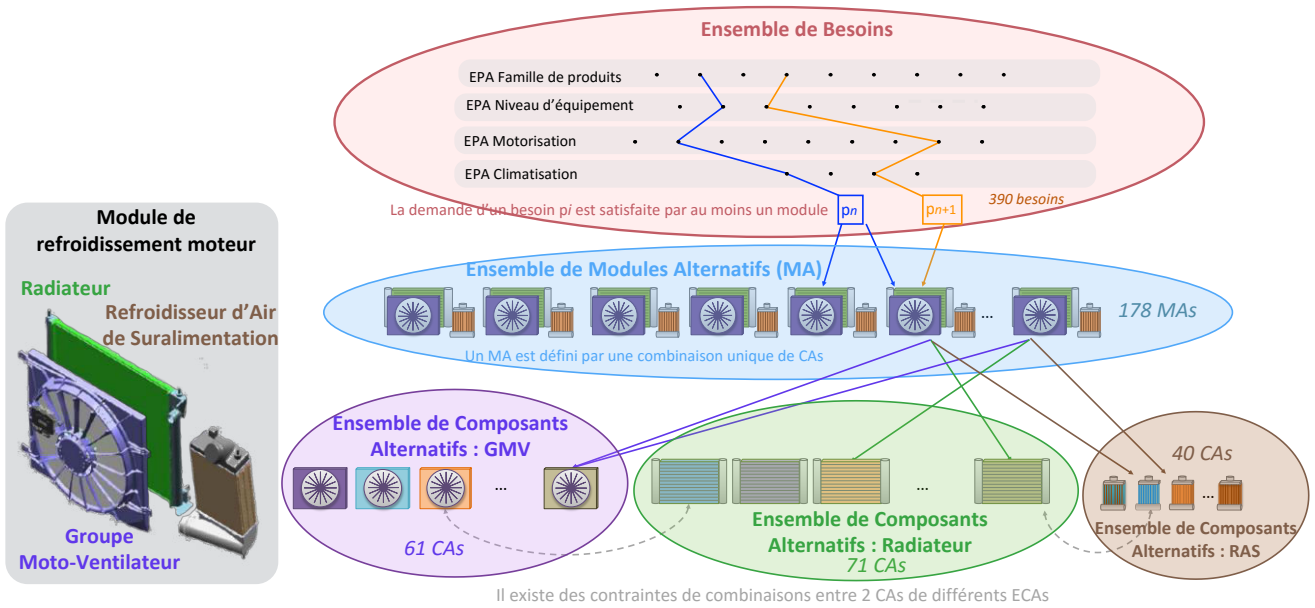


Figure 36 : Illustration du lien entre les besoins, les MAs et les CAs

1.2. Le modèle de base

Cette modélisation fait intervenir quatre types d'ensembles, celui des besoins, celui des MAs, celui des CAs et un ensemble complémentaire que l'on introduira ultérieurement portant des composants de jonction permettant de « coupler » des CAs ne disposant pas d'une interface appropriée.

- L'ensemble des **besoins** comporte P éléments, indicés par p ($p = 1..P$). Pour rappel, un besoin se définit comme la combinaison d'un ensemble de prestations alternatives. Au besoin p est associée la demande d_p devant nécessairement être satisfaite par la solution retenue.
- L'ensemble des **modules alternatifs** comporte M MAs, indicés par m ($m = 1..M$). Certains MAs peuvent ne pas pouvoir répondre aux besoins de certains besoins. Le paramètre booléen a_{pm} vaut 1 si le MA m peut satisfaire le besoin p et 0 dans le cas contraire (d'où le tableau de booléens A). Un MA peut satisfaire plusieurs besoins. Au choix du MA m est associé un coût fixe f_m correspondant à des dépenses de développement et d'investissement, et un coût variable direct de production g_m .
- On distingue K ensembles de **composants alternatifs** (ECAs), indicés par k ($k = 1..K$). L'ECA k comporte C_k composants alternatifs ($c_k = 1..C_k$). Au choix du CA c_k de l'ECA k est associé un coût fixe $w_{c_k}^k$ correspondant à des dépenses de développement

et d'investissement, et un coût variable direct de production $v_{c_k}^k$. Lorsqu'il sera nécessaire de prendre en compte simultanément deux ECAs, on utilisera les indices k_1 et k_2 . Un MA comporte nécessairement un CA pris dans chacun des ECAs. Un CA peut être monté dans plusieurs MAs. Certains CAs peuvent ne pas pouvoir être montés sur certains MAs. Le paramètre booléen $b_{mc_k}^k$ vaut 1 si le MA m peut utiliser le CA c_k de l'ECA k et 0 dans le cas contraire (d'où le tableau de booléens B).

Notons x_{pm} la production du MA m destinée à satisfaire le besoin p . Cette **variable principale** n'est créée que si le besoin p peut être assuré par le module m ($\rightarrow a_{pm} = 1$). La condition (1) garantit que le besoin p est nécessairement satisfait par un module.

$$\sum_{m=1}^{m=M} x_{pm} = d_p, \forall p = 1..P \quad (1)$$

La demande, éventuellement nulle, du module m est alors $\sum_{p=1}^{p=P} x_{pm}$. Il est nécessaire de créer une **variable auxiliaire** y_m valant 1 si le MA m est retenu. Cette variable binaire est liée à la variable principale x_{pm} par la contrainte (2) dans laquelle la constante Ω correspond à une valeur très grande (par exemple ici $\sum_{p=1}^{p=P} d_p$). Cette contrainte est suffisante car la fonction de coût à minimiser intègre la variable y_m pondérée par le coût fixe f_m .

$$\sum_{p=1}^{p=P} x_{pm} \leq \Omega \cdot y_m, \forall m = 1..M \quad (2)$$

Notons $u_{mc_k}^k$ la production du CA c_k de l'ECA k utilisé dans la production du module m . Cette **variable principale** n'est créée que si le CA c_k de l'ECA k peut être monté dans le module m ($\rightarrow b_{mc_k}^k = 1$). La demande, éventuellement nulle, du CA c_k de l'ECA k est $\sum_{m=1}^{m=M} u_{mc_k}^k$. La condition (3) assure que la production du module m mobilise bien une quantité équivalente d'un CA dans chaque ECA.

$$\sum_{c_k=1}^{c_k=C_k} u_{mc_k}^k = \sum_{p=1}^{p=P} x_{pm}, \forall m = 1..M, \forall k = 1..K \quad (3)$$

La **variable auxiliaire** $v_{mc_k}^k$ vaut 1 si le CA c_k de l'ECA k est utilisé par le module m . Cette variable binaire est liée à la variable principale $u_{mc_k}^k$ par la contrainte (4).

$$u_{mc_k}^k \leq \Omega \cdot v_{mc_k}^k, \forall m = 1..M, \forall k = 1..K, \forall c_k = 1..C_k \quad (4)$$

La contrainte (5) permet de garantir que le MA m utilise un seul CA dans chaque ECA.

$$\sum_{c_k=1}^{c_k=C_k} v_{mc_k}^k = y_m, \forall m = 1..M, \forall k = 1..K \quad (5)$$

La **variable auxiliaire** $s_{c_k}^k$ vaut 1 si le CA c_k de l'ECA k est retenu par un ou plusieurs modules et la valeur 0 sinon. Cette variable binaire est liée à la variable principale $u_{mc_k}^k$ par la contrainte (6). Cette contrainte est suffisante parce que la fonction de coût à minimiser intègre cette variable $s_{c_k}^k$ pondérée par le coût fixe $w_{c_k}^k$.

$$\sum_{m=1}^{m=M} u_{mc_k}^k \leq \Omega \cdot s_{c_k}^k, \forall k = 1..K, c_k = 1..C_k \quad (6)$$

La formulation précédente repose sur l'hypothèse implicite selon laquelle aucune contrainte ne limite les combinaisons possibles des CAs montés dans un module. Il est en fait possible que les CAs c_{k_1} et c_{k_2} appartenant aux ECAs k_1 et k_2 ne puissent être assemblés dans un même module, notamment pour des raisons d'interfaçage. Cette **impossibilité de couplage** peut être matérialisée par le booléen $\lambda_{c_{k_1}c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2} = 1$, et valant 0 en l'absence d'interdiction, ce qui conduit au tableau de booléens $\Lambda^{k_1 \wedge k_2}$, à créer pour chaque couple d'ECAs dont les CAs peuvent être interfacés. Cette restriction se traduit par l'introduction de la contrainte (7) générée pour les seules incompatibilités.

$$u_{mc_{k_1}}^{k_1} + u_{mc_{k_2}}^{k_2} \leq \sum_{p=1}^{p=P} x_{pm}, \forall m = 1..M, \forall k_1 = 1..K, \forall k_2 = 1..K \mid k_2 \neq k_1 \wedge \lambda_{c_{k_1}c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2} = 1, \quad (7)$$

$$\forall c_{k_1} = 1..C_{k_1}, \forall c_{k_2} = 1..C_{k_2}$$

Dans certains cas, l'impossibilité de couplage entre les CAs c_{k_1} et c_{k_2} appartenant aux ECAs k_1 et k_2 peut être levée par l'utilisation d'un **composant de jonction** qui conduit à prendre en compte dans la fonction objectif un coût variable direct $\eta_{c_{k_1}c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2}$ et une charge fixe $\theta_{c_{k_1}c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2}$. Cette

possibilité s'exprime par la valeur 1 attribuée au booléen $\gamma_{c_{k_1}c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2}$, lequel vaut 0 en cas du maintien d'impossibilité de couplage. Ceci conduit à l'utilisation de tableaux de booléens $\Gamma_{k_1 \wedge k_2}$ en complément des tableaux $\Lambda^{k_1 \wedge k_2}$. ; ces tableaux sont tels que $\gamma_{c_{k_1}c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2} \leq \lambda_{c_{k_1}c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2}$, puisque le composant d'interfaçage lève une interdiction de couplage.

Il faut alors créer la *variable principale* $\pi_{mc_{k_1}c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2}$ qui représente la demande en composant permettant de lever une interdiction de couplage entre les CAs c_{k_1} et c_{k_2} appartenant aux ECAs k_1 et k_2 dans la création du module m choisi pour satisfaire le besoin p . Cette variable n'existe que si $\gamma_{c_{k_1}c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2} = 1$. La demande totale de ce composant de jonction est $\sum_{m=1}^{m=M} \pi_{mc_{k_1}c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2}$. Pour forcer $\pi_{mc_{k_1}c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2}$ à prendre la valeur de la quantité produite du module m , si les CAs c_{k_1} et c_{k_2} sont retenus, il faut introduire la contrainte (8) conditionnée par l'existence de cette variable.

$$u_{mc_{k_1}}^{k_1} + u_{mc_{k_2}}^{k_2} \leq \sum_{p=1}^{p=P} x_{pm} + \pi_{mc_{k_1}c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2} \quad \forall m=1..M, \forall k_1=1..K, \forall k_2=1..K \mid k_2 \neq k_1 \wedge \gamma_{c_{k_1}c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2} = 1, \quad (8)$$

$$\forall c_{k_1}=1..C_{k_1}, \forall c_{k_2}=1..C_{k_2}$$

La contrainte (7) doit être alors remplacée par la contrainte (9) permettant de tenir compte de composants de jonction dans la contrainte de couplage entre CAs.

$$u_{mc_{k_1}}^{k_1} + u_{mc_{k_2}}^{k_2} \leq \sum_{p=1}^{p=P} x_{pm}, \quad \forall m=1..M, \forall k_1=1..K, \forall k_2=1..K \mid k_2 \neq k_1 \wedge \lambda_{c_{k_1}c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2} + \gamma_{c_{k_1}c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2} = 1, \quad (9)$$

$$\forall c_{k_1}=1..C_{k_1}, \forall c_{k_2}=1..C_{k_2}$$

Il faut créer la *variable auxiliaire* $\rho_{c_{k_1}c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2}$ valant 1 si la solution requiert un composant de jonction entre les CAs c_{k_1} et c_{k_2} appartenant aux ECAs k_1 et k_2 dans la création d'un module. Cette variable binaire est liée à la variable principale $\pi_{mc_{k_1}c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2}$ par la contrainte (10), suffisante parce que la fonction de coût à minimiser intègre la variable $\rho_{c_{k_1}c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2}$ pondérée par le coût fixe $\theta_{c_{k_1}c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2}$.

$$\sum_{m=1}^{m=M} \pi_{mc_{k_1}c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2} \leq \Omega \cdot \rho_{c_{k_1}c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2}, \quad \forall k_1=1..K, \forall k_2=1..K \mid k_2 \neq k_1 \wedge \gamma_{c_{k_1}c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2} = 1, \quad (10)$$

$$\forall c_{k_1}=1..C_{k_1}, \forall c_{k_2}=1..C_{k_2}$$

La **fonction objectif** à minimiser est une somme pondérée de variables binaires, correspondant à une somme de charges fixes et de charges variables proportionnelles aux quantités à produire. On reviendra au §2.1 sur la définition des coefficients associés à ces variables. Les trois charges fixes sont celles induites par la sélection des MAs, $\sum_{m=1}^{m=M} f_m \cdot y_m$, celles induites par la sélection des CAs, $\sum_{k=1}^{k=K} \sum_{c_k=1}^{c_k=C_k} w_{c_k}^k \cdot s_{c_k}^k$ et celles induites par la sélection des composants de jonction, $\sum_{k_1=1}^{k_1=K_1} \sum_{k_2=1, k_1 \neq k_2}^{k_2=K_2} \sum_{c_{k_1}=1}^{c_{k_1}=C_{k_1}} \sum_{c_{k_2}=1}^{c_{k_2}=C_{k_2}} \theta_{c_{k_1} c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2} \cdot \rho_{c_{k_1} c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2}$.

Trois charges variables proportionnelles aux quantités produites doivent être ajoutées dans cette fonction de coûts à minimiser.

- La demande globale du MA m , $\sum_{p=1}^{p=P} x_{pm}$ est à pondérer par son coût variable direct g_m , d'où le coût partiel : $\sum_{m=1}^{m=M} g_m \sum_{p=1}^{p=P} x_{pm}$.
- La demande globale du CA c_k de l'ECA k , $\sum_{m=1}^{m=M} u_{mc_k}^k$ est à pondérer par son coût variable direct $v_{c_k}^k$, d'où le coût partiel : $\sum_{k=1}^{k=K} \sum_{c_k=1}^{c_k=C_k} v_{c_k}^k \cdot \sum_{m=1}^{m=M} u_{mc_k}^k$.
- Enfin, la demande globale du composant de jonction entre les CAs c_{k_1} et c_{k_2} , $\sum_{m=1}^{m=M} \pi_{mc_{k_1} c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2}$ est à pondérer par son coût variable direct $\eta_{c_{k_1} c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2}$, d'où le coût partiel $\sum_{k_1=1}^{k_1=K} \sum_{k_2=1, k_1 \neq k_2}^{k_2=K} \sum_{c_{k_1}=1}^{c_{k_1}=C_{k_1}} \sum_{c_{k_2}=1}^{c_{k_2}=C_{k_2}} \eta_{c_{k_1} c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2} \cdot \sum_{m=1}^{m=M} \pi_{mc_{k_1} c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2}$.

Cette fonction de coûts est une fonction affine combinant, pour chaque référence retenue (CA ou MA), une dépense qui dépend du volume à produire égale à la demande à satisfaire, et une charge fixe indépendante de ce volume. On verra au §2.2 comment tenir compte de fonctions de coûts affines par morceaux, ce qui permet de couvrir pratiquement tous les cas de figure rencontrés.

2. Amélioration de la définition de la fonction objectif

La variété offerte par une entreprise résulte du développement de différents produits dans le temps. En effet, comme les entreprises proposent de plus en plus de produits sur le marché, tous les produits vendus à l'instant t n'ont pas été conçus simultanément. Dans le cadre de la standardisation, cela implique donc que les entreprises doivent prendre en compte différentes typologies de produits : les produits conçus par le passé et dont la production, soit va s'arrêter

bientôt, soit vient de démarrer ; les produits actuellement en développement et les produits qui vont bientôt être développés (produits en cours de préconception, niveau stratégique). Le positionnement dans le temps spécifique à chaque produit ou à chaque famille de produits (Figure 37) impose la prise en compte d'un horizon de temps dans le modèle d'optimisation de la standardisation.

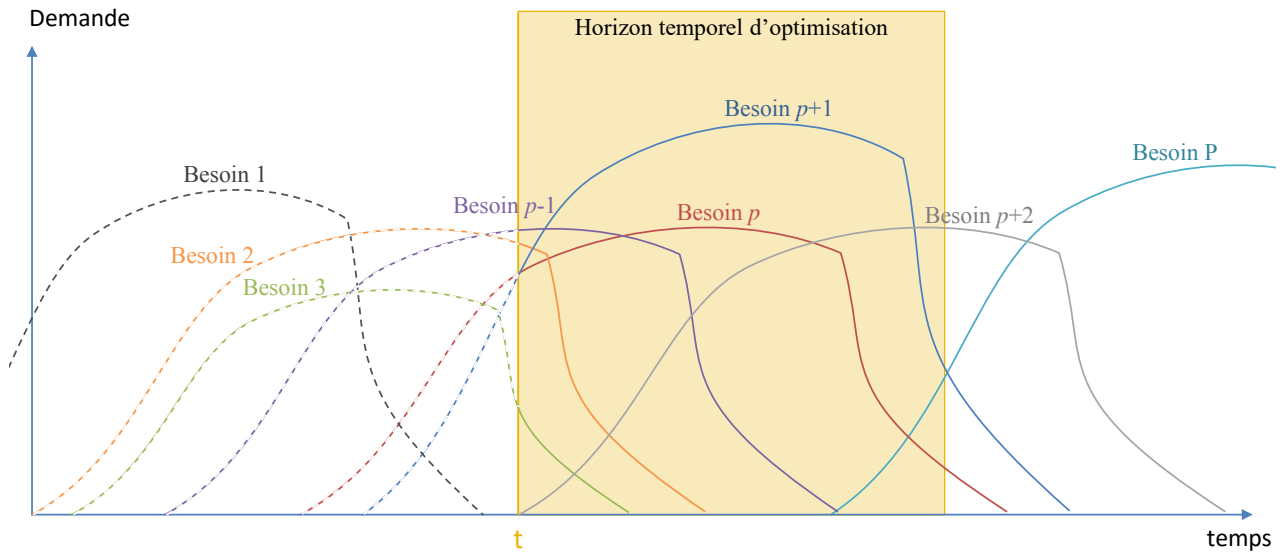


Figure 37 : Évolution dans le temps du profil de la demande de plusieurs besoins

Le modèle présenté est d'apparence statique mais il permet assez facilement d'intégrer l'évolution de la demande, qui n'intervient que sur les charges variables directes et moyennant une légère adaptation, il permet aussi de prendre en compte les dates de lancement de nouveaux CAs. Il intègre également une dimension spatiale en permettant une prise en compte implicite de la localisation des sites productifs dans la chaîne logistique.

2.1. Composantes temporelles et spatiales

2.1.1. Dimension temporelle

Les demandes des besoins déterminent celles des MAs et donc celles des CAs. La prise en compte de **l'évolution temporelle de la demande** conduit à remplacer d_p par d_{pt} , et donc x_{pm} par x_{pmt} et u_{mck}^k par u_{mckt}^k , associées aux périodes t définies sur l'horizon économique retenu ($t=1..T$). Cela conduit à modifier les relations (1) et (3) et en cascade, à remplacer la fonction de coûts par la somme des coûts partiels de production actualisés avec un taux d'actualisation périodique α approprié. En l'absence de dérive des coûts variables directs g_m exprimés en

monnaie constante, le coût variable direct actualisé du MA m est $g_m \cdot \sum_{p=1}^{p=P} \sum_{t=1}^{t=T} x_{pmt} \cdot (1+\alpha)^{-t}$ et celui du CA c_k , est : $v_{c_k}^k \cdot \sum_{m=1}^{m=M} \sum_{t=1}^{t=T} u_{mc_k t}^k \cdot (1+\alpha)^{-t}$.

En posant $d_p = \sum_{t=1}^{t=T} d_{pt} \cdot (1+\alpha)^{-t}$, on retrouve la formulation initiale (relations (1) et (3)) en prenant en compte la dimension temporelle directement dans la définition des paramètres du modèle. Cette formulation permet de réduire sensiblement le nombre de variables puisqu'il permet de réutiliser x_{pm} et $u_{mc_k}^k$ au lieu de x_{pmt} et $u_{mc_k t}^k$. De cette façon, nous pouvons alors réutiliser respectivement x_{pm} et $u_{mc_k}^k$ pour $\sum_{t=1}^{t=T} x_{pmt} \cdot (1+\alpha)^{-t}$ et $\sum_{t=1}^{t=T} u_{mc_k t}^k \cdot (1+\alpha)^{-t}$. Il s'en suit que le coût partiel actualisé du MA m ($g_m \cdot \sum_{p=1}^{p=P} \sum_{t=1}^{t=T} x_{pmt} \cdot (1+\alpha)^{-t}$) reste $g_m \cdot \sum_{p=1}^{p=P} x_{pm}$ et que celui du CA c_k reste $v_{c_k}^k \cdot \sum_{m=1}^{m=M} u_{mc_k}^k$. Cela permet ainsi de garder la formulation initiale proposée au §1.2 de la fonction objectif.

L'inconvénient de cette formulation est qu'elle implique une stabilité au cours du temps à la fois de l'affectation de la production du MA m aux besoins qui l'utilisent et de l'affectation de la production du CA c_k aux MAs qui l'utilisent. On verra comment lever cette hypothèse, parfois nécessaire, après un exemple rapide de cette approche.

Le [Tableau 17](#) illustre cette démarche sur un exemple fictif portant sur un MA avec un horizon de 5 ans et un taux d'actualisation de $\alpha = 10\%$. Le MA m est réputé être déjà en service (et non à l'étude), ce qui n'implique pas que les CAs qu'il utilise restent les mêmes. On suppose que ce MA m est utilisé par trois des besoins qui lui sont potentiellement liés ($a_{pm} = 1$), ce qui conduit aux productions non nulles x_{p1mt} , x_{p2mt} et x_{p3mt} égales aux demandes de ces besoins en l'absence de contraintes productives.

Tableau 17 : Illustration de la démarche d'utilisation des demandes actualisées dans la détermination des coefficients de la fonction objectif

t	d_{p_1t}	d_{p_2t}	d_{p_3t}	$\sum_{p=1}^{p=P} x_{pmt}$ $= \sum_{p=1}^{p=P} d_{pt}$	$\sum_{p=1}^{p=3} x_{pmt}$ $\frac{\sum_{p=1}^{p=3} x_{pmt}}{(1+0.1)^t}$	$\frac{d_{p_1t}}{(1+0.1)^t}$	$\frac{d_{p_2t}}{(1+0.1)^t}$	$\frac{d_{p_3t}}{(1+0.1)^t}$
5	8500	7200	5500	21200	13163,5	5277,8	4470,6	3415,1
4	7500	7000	4600	19100	13045,6	5122,6	4781,1	3141,9
3	8000	7500	4800	20300	15251,7	6010,5	5634,9	3606,3
2	7300	6800	4800	18900	15619,8	6033,1	5619,8	3966,9
1	7200	6600	4700	18500	16818,2	6545,5	6000,0	4272,7
$\sum_{p=1}^{p=P} x_{pm} = \sum_{p=1}^{p=S} \sum_{t=1}^{t=5} \frac{x_{pmt}}{(1+0.1)^t}$					73898,8	28989,5	26506,4	18402,9
$\sum_{p=1}^{p=3} d_p = \sum_{p=1}^{p=3} \sum_{t=1}^{t=5} \frac{d_{pt}}{(1+0.1)^t}$						73898,8		
							$d_p = \sum_{t=1}^{t=5} \frac{d_{pt}}{(1+0.1)^t}$	

Dans cette prise en compte du temps, trois remarques additionnelles doivent être faites.

L'hypothèse de stabilité de l'affectation au cours du temps de certains MAs (ou CAs) peut ne pas être respectée dans la mesure où certains MAs (ou CAs) peuvent n'être qu'à l'étude, le développement du produit n'étant pas encore commencé. La formulation du problème doit alors être modifiée puisque le MA encore en phase de conception ne peut pas être choisi dès le début de l'horizon d'optimisation pour répondre à certains besoins. La charge fixe associée à la sélection de tels MAs est alors une somme actualisée de ces dépenses de développement et, le cas échéant, d'investissement. En revanche, pour conserver la formulation $d_p = \sum_{t=1}^{t=T} d_{pt} \cdot (1+\alpha)^{-t}$ utile dans le calcul de la charge variable associée à la sélection de tels MAs, il est nécessaire de scinder en deux les besoins susceptibles de mobiliser ce MA m , c'est-à-dire ceux pour lesquels le prédicat $a_{pm} = 1$ est vrai. On notera p' et p'' les besoins remplaçant le besoin p . À titre d'exemple, le [Tableau 18](#) introduit, par rapport au [Tableau 17](#), la possibilité de remplacer le module m_1 par un nouveau module m_2 moins cher à partir de la 3^e année. Bien évidemment, la somme des charges variables directes actualisées des modules m_1' et m_1'' est égale à la valeur actualisée des charges variables directes du module m_1 . Les besoins des trois besoins initiaux, dédoublés ici, peuvent être satisfaits par la solution mobilisant m_1 pour les six besoins nouvellement créés ou ceux mobilisant m_1 pour les besoins p_1' , p_2' et p_3' et m_2 pour les besoins p_1'' , p_2'' et p_3'' . Cette prise en compte du temps ne change donc rien à la formulation analytique du problème de standardisation multi-niveaux, elle ne joue que dans la définition des données utilisées et est à traiter en amont du processus d'optimisation.

Cette prise en compte de l'évolution temporelle de la demande par une « demande actualisée » permet de traiter des demandes intervenant plus tard que la première année, par simple modification de la borne inférieure de la sommation. Cette possibilité est intéressante lorsque l'on s'intéresse à des besoins nouveaux ou à des besoins se substituant ultérieurement à des besoins actuels (cf. [Tableau 18](#)).

Tableau 18 : Illustration de la prise en compte de la segmentation temporelle des demandes, liée à l'arrivée de nouveaux MAs

t	d_{p1t}	d_{p2t}	d_{p3t}	d_{p4t}	d_{p5t}	d_{p6t}	$\sum_p x_{pm1t}$	$\frac{\sum_p x_{pm1t}}{(1+0.1)^t}$	$\sum_p x_{pm2t}$	$\frac{\sum_p x_{pm2t}}{(1+0.1)^t}$	$\frac{d_{p1t}}{(1+0.1)^t}$	$\frac{d_{p2t}}{(1+0.1)^t}$	$\frac{d_{p3t}}{(1+0.1)^t}$	$\frac{d_{p4t}}{(1+0.1)^t}$	$\frac{d_{p5t}}{(1+0.1)^t}$	$\frac{d_{p6t}}{(1+0.1)^t}$
5		8500		7200		5500			21200	13163,5		5277,8		4470,6		3415,1
4		7500		7000		4600			19100	13045,6		5122,6		4781,1		3141,9
3		8000		7500		4800			20300	15251,7		6010,5		5634,9		3606,3
2	7300		6800		4800		18900	15619,8			6033,1		5619,8		3966,9	
1	7200		6600		4700		18500	16818,2			6545,5		6000,0		4272,7	
$\sum_p x_{pm1} = \sum_s \sum_{t=1}^{t=5} \frac{x_{pm1t}}{(1+0.1)^t}$							32438,0			41460,8	12578,5	16411,0	11619,8	14886,6	8239,7	10163,2
$\sum_p x_{pm2} = \sum_p \sum_{t=1}^{t=5} \frac{x_{pm2t}}{(1+0.1)^t}$													32438,0	41460,8		
$\sum_p d_{p'} = \sum_{p'} \sum_{t=1}^{t=5} \frac{d_{p't}}{(1+0.1)^t}$																
$\sum_{p'} d_{p'} = \sum_s \sum_{t=1}^{t=5} \frac{d_{p't}}{(1+0.1)^t}$																

- Cette démarche de partition des demandes des besoins permet de lever facilement, si nécessaire, l'hypothèse simplificatrice d'un même MA couvrant toute la demande d'un besoin sur l'horizon économique retenu. Elle permet également de tenir compte facilement de changements rendus nécessaires à la suite d'une mise en œuvre progressive de nouvelles normes.
- La définition d'un horizon économique H pertinent présente des difficultés méthodologiques communes à toutes les analyses économiques de lancement de produits nouveaux (Giard 1983, 2003 ; Gautier et Giard 2000) ; elle ne sera donc pas traitée ici.

2.1.2. Dimension spatiale

Dans cette modélisation, les coefficients de la fonction objectif comportent implicitement une dimension spatiale : la localisation des productions des composants alternatifs et des modules alternatifs détermine les coûts de production (Baud-Lavigne *et al.*, 2012). Si l'on suppose prédéterminées les localisations des lignes d'assemblage final et les productions qui leur sont assignées, les coûts d'acheminement final ne sont que peu impactés par les décisions à prendre. Le choix de modules alternatifs montés sur une usine d'assemblage peut avoir un impact sur le coût d'assemblage intégré dans le coût variable direct ; si ce MA est monté sur plusieurs lignes d'assemblage, ce raisonnement n'est valide que si l'impact économique est voisin. Le choix de la localisation de l'usine de production d'un nouveau composant alternatif a un rôle important sur le coût variable direct qui intègre des coûts de production mais aussi des coûts

d'acheminement des CAs aux lignes d'assemblage. Ce choix est relativement évident si cette décision n'est pas impactée par des décisions portant sur d'autres CAs pouvant être fabriqués sur le même site, en raison de synergies possibles. En cas de synergie, il faut modifier la formulation du problème en y intégrant la problématique du design de la chaîne logistique. Cet aspect n'est pas pris en compte ici.

2.2. Prise en compte de la non-linéarité de certains coûts de la fonction objectif

Dans la modélisation précédente, la production d'un composant ou d'un module intervient dans la fonction objectif sous la forme d'une fonction affine, avec une charge fixe correspondant à des investissements (études, équipements...) préalables à cette production et une charge proportionnelle aux quantités produites, ces charges n'étant supportées que si le composant ou le module est produit. Cette fonction affine s'avère inappropriée, en particulier dans le cas de charges fixes de production variant par palier (par exemple, des lignes de production pouvant être utilisées par une, deux ou trois équipes).

On utilise classiquement une fonction affine par morceaux pour approximer une fonction non-linéaire. Depuis les années soixante, l'application de ce principe à la fonction objectif d'un programme linéaire conduit à une formulation du problème par un programme linéaire mixte combinant des variables réelles ou entières avec des variables binaires (Keha *et al.*, 2004). Cette approche est classique en management (Giard, 2003) et a déjà été appliquée au problème de l'analyse économique de la standardisation dans un ensemble de composants alternatifs (Giard, 1999, 2002). L'adaptation de cette modélisation au problème de standardisation multi-niveaux proposé dans ce modèle, s'appuie sur l'exemple du coût de production du module alternatif m , la transposition aux coûts des composants alternatifs étant évidente. La Figure 38 illustre la démarche dans une situation caractérisée par quatre zones contiguës de linéarité du coût de production d'un MA.

Dans ce cadre général, le coût de production d'une quantité χ_{qm}^m du MA m est modélisé par une fonction affine sur l'intervalle qm ($qm = 1..Q^m$) défini par $D_{qm-1}^m < \chi_{qm}^m \leq D_{qm}^m$. On introduit la variable binaire auxiliaire ψ_{qm}^m valant 1 si $\chi_{qm}^m > 0$. Dans chaque plage, le coût variable direct de production g_m doit être remplacé par e_{qm}^m . Le coût fixe f_m est à remplacer par l'ordonnée à l'origine E_{qm}^m de la droite de coût de l'intervalle considéré d'équation

$e_{q^m}^m \cdot \chi_{q^m}^m + E_{q^m}^m \cdot \psi_{q^m}^m$; il est à noter que $E_{q^m}^m$ ne s'interprète plus comme un coût fixe. La contrainte (11) force la variable $\chi_{q^m}^m$ à être nulle si $\psi_{q^m}^m = 0$. La contrainte (12) implique que la production du MA m n'est possible que dans un seul des intervalles q^m si ce MA est retenu. La relation (13) définit la production totale, éventuellement nulle, puisque le module m peut ne pas être retenu.

$$D_{q^m-1}^m \cdot \psi_{q^m}^m < \chi_{q^m}^m \leq D_{q^m}^m \cdot \psi_{q^m}^m \quad (11)$$

$$\sum_{q^m=1}^{q^m=Q^m} \psi_{q^m}^m \leq 1 \quad (12)$$

$$\sum_{p=1}^{p=P} x_{pm} = \sum_{q^m=1}^{q^m=Q^m} \chi_{q^m}^m \quad (13)$$

Il convient donc de remplacer dans la fonction objectif, le coût de production du MA m , $f_m \cdot y_m + g_m \sum_{p=1}^{p=P} x_{pm}$, par $\sum_{q^m=1}^{q^m=Q^m} (e_{q^m}^m \cdot \chi_{q^m}^m + E_{q^m}^m \cdot \psi_{q^m}^m)$.

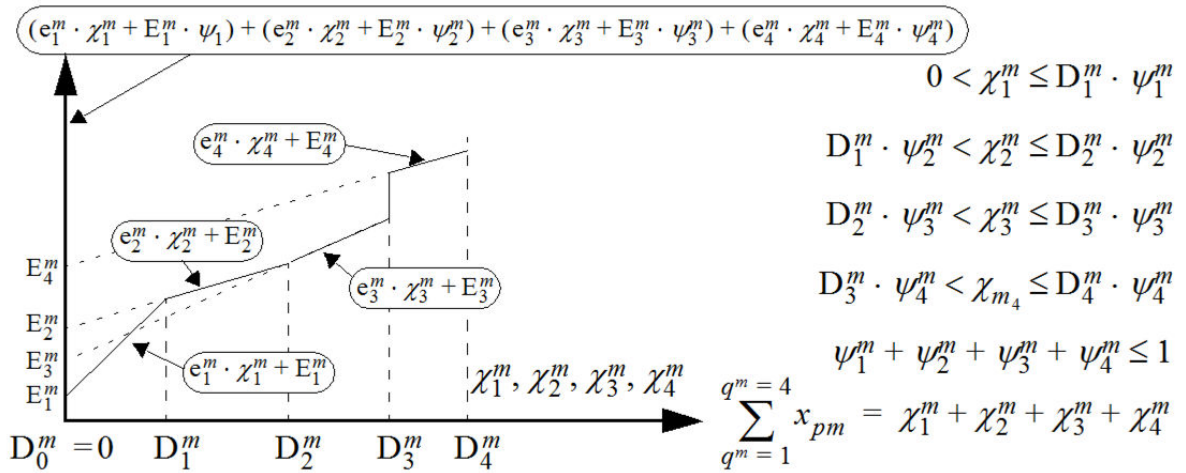


Figure 38 : Représentation du coût total par une fonction affine par morceaux (avec $Q^m = 4$).

L'utilisation combinée de fonctions de coûts affines par morceaux avec la prise en compte d'une segmentation temporelle des demandes de certains besoins pour tenir compte de la possible introduction de nouveaux MAs ou CAs (§2.1.1) demande un ajustement. En effet, les $D_{q^m}^m$ doivent être préalablement définis de manière à tenir compte des demandes et des volumes de production actualisés.

2.3. Prise en compte de contraintes additionnelles

La fonction objectif utilisée implique que le coût de production d'un module ou d'un composant est indépendant du choix des autres modules ou composants. Ceci n'est pas pertinent en cas de synergies positives ou négatives, ce qui peut se produire par exemple quand un même fournisseur fabrique plusieurs CAs dans un même site. Quelques contraintes additionnelles peuvent être nécessaires pour traiter le problème se posant en entreprise.

2.3.1. Prise en compte de synergies de production dans la fonction objectif

Les composantes du coût de production d'un MA (ou d'un CA) utilisé dans la fonction objectif reposent sur une hypothèse de localisation de sa production dans une usine précise (cf. §2.1.2). L'additivité des coûts de production d'un MA (ou d'un CA) dans cette fonction implique l'absence d'interaction de cette production avec celle d'autres MAs (ou CAs) produits dans le même site, ce qui n'est pas toujours réaliste. Cet aspect, abordé par Giard (1999, 2002) dans le cadre d'une standardisation portant sur un ECA, vise à prendre en compte la possibilité que plusieurs composants ou modules fabriqués dans une même usine, induisent des économies d'échelle (synergie positive) ou, au contraire, des déséconomies d'échelle liées par exemple à la mobilisation d'une équipe de nuit sur une ligne de production (synergies négatives).

On propose ici une formulation générale permettant de traiter aussi bien des synergies positives que négatives. Cette formulation, plus générale que celle proposée dans Giard (1999, 2002), repose sur l'hypothèse réaliste selon laquelle ces synergies sont le plus souvent liées au volume global de production des MAs retenus appartenant à l'ensemble \mathcal{E} , avec un impact possible sur les charges fixes et/ou sur les charges variables directes. Comme précédemment, on se limitera, dans la présentation formelle de cette extension du modèle proposé, au cas de synergies affectant un ensemble unique \mathcal{E} de MAs mais la généralisation à plusieurs ensembles de MAs et/ou de CAs est immédiate. Cet impact groupé peut s'avérer une alternative plus réaliste que celle de fonctions affines par morceaux pour quelques CAs ou MAs. Cette généralisation reprend des principes utilisés dans la formalisation de fonctions de coûts affines par morceaux.

Notons $d_{\mathcal{E}} = \sum_{m \in \mathcal{E}} \sum_{p=1}^{p=P} x_{pm}$, la demande totale des MAs retenus dans le problème d'optimisation. La variation de coût induite par cette sélection est linéaire pour une production cumulée $\chi_{q^{\mathcal{E}}}^{\mathcal{E}}$ produite dans l'intervalle $q^{\mathcal{E}}$ ($q^{\mathcal{E}} = 1..Q^{\mathcal{E}}$) défini par $D_{q^{\mathcal{E}}-1}^{\mathcal{E}} < \chi_{q^{\mathcal{E}}}^{\mathcal{E}} \leq D_{q^{\mathcal{E}}}^{\mathcal{E}}$. On introduit la variable binaire auxiliaire $\psi_{q^{\mathcal{E}}}^{\mathcal{E}}$ valant 1 si $\chi_{q^{\mathcal{E}}}^{\mathcal{E}} > 0$, auquel cas, la variation de coût dans la fonction objectif est $e_{q^{\mathcal{E}}}^{\mathcal{E}} \cdot \chi_{q^{\mathcal{E}}}^{\mathcal{E}} + E_{q^{\mathcal{E}}}^{\mathcal{E}} \cdot \psi_{q^{\mathcal{E}}}^{\mathcal{E}}$. La contrainte (14) force la variable $\chi_{q^{\mathcal{E}}}^{\mathcal{E}}$ à

être nulle si $\psi_{q^\mathcal{E}} = 0$. La contrainte (15) implique que la synergie n'est possible que dans un seul des intervalles de la production cumulée si tous les MAs de cet ensemble \mathcal{E} sont retenus. La relation (16) définit la production totale des MAs sélectionnés, appartenant à l'ensemble \mathcal{E} .

$$D_{q^\mathcal{E}-1}^\mathcal{E} \cdot \psi_{q^\mathcal{E}} < \chi_{q^\mathcal{E}}^\mathcal{E} \leq D_{q^\mathcal{E}}^\mathcal{E} \cdot \psi_{q^\mathcal{E}} \quad (14)$$

$$\sum_{q^\mathcal{E}=1}^{q^\mathcal{E}=Q^\mathcal{E}} \psi_{q^\mathcal{E}}^\mathcal{E} \leq 1 \quad (15)$$

$$\sum_{m \in \mathcal{E}} \sum_{s=1}^{s=S} x_{sm} = \sum_{q^\mathcal{E}=1}^{q^\mathcal{E}=Q^\mathcal{E}} \chi_{q^\mathcal{E}}^\mathcal{E} \quad (16)$$

Il convient d'ajouter dans la fonction objectif la variation de coût induite par cette synergie positive ou négative : $\sum_{q^\mathcal{E}=1}^{q^\mathcal{E}=Q^\mathcal{E}} (e_{q^\mathcal{E}}^\mathcal{E} \cdot \chi_{q^\mathcal{E}}^\mathcal{E} + E_{q^\mathcal{E}}^\mathcal{E} \cdot \psi_{q^\mathcal{E}}^\mathcal{E})$.

L'exemple de la Figure 39 illustre le cas d'une synergie négative sur les seules charges fixes et d'une synergie mixte (négative ou positive sur les charges fixes et sur les charges variables directes). La synergie positive (respectivement négative) sur les charges variables directes revient à appliquer une même diminution (respectivement augmentation) à tous les coûts variables directs, ce qui permet normalement de prendre correctement en compte l'impact « global » de la sélection opérée dans l'ensemble \mathcal{E} .

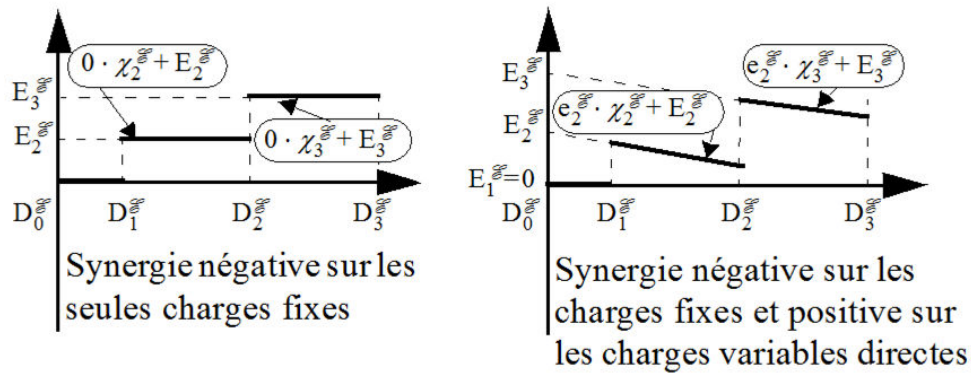


Figure 39 : Exemple de modification de la fonction objectif induite par des synergies.

2.3.2. Prise en compte de contraintes spécifiques

La définition d'une politique de standardisation doit tenir compte de l'existant : si la solution optimale nécessite trop de changements, elle peut être impossible à mettre en place. Il convient alors d'introduire des contraintes pour faciliter la mise en œuvre d'une solution peut-être sous-

optimale mais réalisable. Chatras et Giard (2014) proposent dans cette perspective l'adjonction de deux contraintes au problème d'optimisation.

- Il peut être nécessaire d'imposer à la solution optimale de retenir, dans un ensemble \mathcal{H} , un nombre minimal $n_{\mathcal{H}}$ de MAs. Cet ensemble peut correspondre, par exemple, à un ensemble de MAs existants ou de MAs existants ou à l'étude produit sur un site donné ou par un fournisseur donné. Bien évidemment, ces contraintes peuvent porter sur des CAs. En restant sur l'exemple des MAs, il faut alors introduire la contrainte (17).

$$\sum_{m \in \mathcal{H}} y_m \geq n_{\mathcal{H}} \quad (17)$$

Cette contrainte s'adapte immédiatement si elle doit porter sur un volume minimal $X_{\min}^{\mathcal{H}}$ de production dans cet ensemble.

$$\sum_{m \in \mathcal{H}} \sum_{p=1}^{p=P} x_{pm} \geq X_{\min}^{\mathcal{H}} \quad (18)$$

- Il est possible également qu'une contrainte de capacité ($X_{\max}^{\mathcal{H}}$) d'une usine produisant cet ensemble de MAs (ou de CAs) empêche d'atteindre la solution économiquement optimale. De telles contraintes peuvent conduire à satisfaire un besoin p par plusieurs MAs de caractéristiques similaires mais de coûts de production différents, parce que fabriqués sur des sites différents. La relation (19) doit alors être introduite.

$$\sum_{m \in \mathcal{H}} \sum_{p=1}^{p=P} x_{pm} \leq X_{\max}^{\mathcal{H}} \quad (19)$$

On peut noter qu'en l'absence de telle contrainte, la solution optimale conduit nécessairement à répondre à un besoin p avec un seul module, celui dont le coût est le plus faible.

3. Récapitulatif des notations utilisées

SIGLES	Définition
PA	Prestation Alternative
MA	Module alternatif
CA	Composant Alternatif
ECA	Ensemble de Composants Alternatifs

INDICES

p	Indice repérant un besoin ($p = 1..P$)
m	Indice repérant un MA ($m = 1..M$). E repère un sous-ensemble de MAs
k	Indice repérant un ECA ($k = 1..K$). Remarque : k_1 et k_2 si analyse conjointe de 2 ECAs
C_k	Nombre de CAs de l'ECA k
c_k	Indice ($c_k = 1..C_k$) repérant un CA dans l'ECA k . Remarque : c_{k_1} et c_{k_2} si analyse conjointe de 2 ECAs
q^m	Indice ($q^m = 1..Q^m$) de la plage de valeurs de production possibles, d'une fonction de coût de production du module m , affine par morceaux.
$q^{\mathcal{E}}$	Indice ($q^{\mathcal{E}} = 1..Q^{\mathcal{E}}$) de la plage de valeurs de production cumulées du sous-ensemble \mathcal{E} de MAs, d'une fonction affine par morceaux définissant l'impact de la synergie de la production de ce sous-ensemble
t	Indice repérant la période ($t = 1..T$)

PARAMÈTRES TECHNIQUES

Ω	Constante arbitrairement élevée ($\Omega > \sum_{p=1}^{p=P} d_p$)
α	Taux d'actualisation périodique
a_{pm}	Paramètre binaire indiquant si le besoin p peut être satisfait par le module m ($a_{pm} = 1$) \rightarrow tableau A
$b_{mc_k}^k$	Paramètre binaire indiquant si le CA c_k de l'ECA k peut être monté dans le module m par le module m ($b_{mc_k}^k = 1$) \rightarrow tableau B

$D_{q^m}^m$	Borne supérieure de la plage de valeurs de production q^m , associée à une fonction de coût linéaire, dans le cas d'une fonction de coûts affine par morceaux
$\lambda_{c_{k_1} c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2}$	Paramètre binaire tel que $\lambda_{c_{k_1} c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2} = 1$ si l'interdiction de couplage, dans un même module, des CAs c_{k_1} et c_{k_2} appartenant aux ECAs k_1 et k_2 ne peuvent être assemblés dans un même module \rightarrow tableau $\Lambda^{k_1 \wedge k_2}$
$\gamma_{c_{k_1} c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2}$	Paramètre binaire tel que $\gamma_{c_{k_1} c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2} = 1$ si l'interdiction de couplage, dans un même module, des CAs c_{k_1} et c_{k_2} appartenant aux ECAs k_1 et k_2 ($\lambda_{c_{k_1} c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2} = 1$), peut être levée par un composant de jonction \rightarrow tableaux $\Gamma^{k_1 \wedge k_2}$
d_p	Demande à satisfaire pour le besoin p . Ce paramètre devient d_{pt} dans la version dynamique du problème, mais son utilisation est rendue inutile avec le recours aux demandes actualisées.

VARIABLES

x_{pm}	Production du MA m destinée à satisfaire le besoin p . Cette variable devient x_{pmt} dans la version dynamique du problème, mais son utilisation est rendue inutile avec le recours aux demandes actualisées.
y_m	Variable binaire auxiliaire =1 si le module m est produit (z_m liée à q_{pm} par (2))
$\chi_{q^m}^m$	Quantité du module m produite dans l'intervalle q^m
$\psi_{q^m}^m$	Variable binaire auxiliaire =1 si la production du module m se situe dans l'intervalle q^m

$u_{mc_k}^k$	Production du CA c_k de l'ECA k utilisé dans la production du module m . Cette variable devient $u_{mc_k,t}^k$ dans la version dynamique, mais son utilisation est rendue inutile avec le recours aux demandes actualisées.
$v_{mc_k}^k$	Variable binaire auxiliaire =1 si le CA c_k de l'ECA k est utilisé par le module m ($v_{mc_k}^k$ liée à $u_{mc_k}^k$ par (4))
$s_{c_k}^k$	Variable binaire auxiliaire =1 si le CA c_k de l'ECA k est utilisé par un ou plusieurs modules ($s_{c_k}^k$ liée à $u_{mc_k}^k$ par (6))
$\pi_{mc_{k_1}c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2}$	Production du composant de jonction entre les CAs c_{k_1} et c_{k_2} appartenant aux ECAs k_1 et k_2 pour produire le module m
$\rho_{c_{k_1}c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2}$	Variable binaire auxiliaire =1 si un composant de jonction entre les CAs c_{k_1} et c_{k_2} appartenant aux ECAs k_1 et k_2 ($\rho_{c_{k_1}c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2}$ liée à $\pi_{mc_{k_1}c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2}$ par (10))

COÛTS

g_m	Coût variable direct du module m
f_m	Coût fixe supporté si le module m est retenu
$v_{c_k}^k$	Coût variable direct du CA c_k de l'ECA k
$w_{c_k}^k$	Coût fixe supporté si le CA c_k de l'ECA k est retenu
$\eta_{c_{k_1}c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2}$	Coût variable direct du composant de jonction utilisé pour lever l'interdiction de couplage entre les CAs c_{k_1} et c_{k_2} appartenant aux ECAs k_1 et k_2 .

$\theta_{c_{k_1} c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2}$	Coût fixe supporté si l'interdiction de couplage entre les CAs c_{k_1} et c_{k_2} appartenant aux ECAs k_1 et k_2 peut être levée par l'utilisation d'un composant de jonction
$E_{q^m}^m$	Ordonnée à l'origine de la fonction de coût affine par morceaux pour une production du module m , effectuée dans la plage de valeurs q^m .
$e_{q^m}^m$	Coût variable direct de la fonction de coût affine par morceaux pour une production du module m , effectuée dans la plage de valeurs q^m .
$E_{q^{\mathcal{E}}}^{\mathcal{E}}$	Ordonnée à l'origine de la fonction affine par morceaux définissant l'impact de la synergie de la production cumulée de ce sous-ensemble \mathcal{E} , lorsque cette production s'effectue dans la plage $q^{\mathcal{E}}$
$e_{q^{\mathcal{E}}}^{\mathcal{E}}$	Coût variable direct de la fonction affine par morceaux définissant l'impact de la synergie de la production cumulée de ce sous-ensemble \mathcal{E} , lorsque cette production s'effectue dans la plage $q^{\mathcal{E}}$

Chapitre 11. Implémentation sur un exemple réel

Ce modèle a été appliqué à un cas réel rencontré chez Renault. L'exemple retenu porte sur un système de refroidissement moteur d'un véhicule automobile. Le secteur automobile semble avoir été le support de la majorité des travaux de rationalisation de la diversité mais notre positionnement directement au niveau d'un constructeur automobile et non au niveau d'un fournisseur du secteur semble beaucoup plus rare. Dans un premier paragraphe, nous décrirons le cas industriel utilisé (§1), ensuite nous détaillerons notre mise en place de l'exemple et nos résultats (§2). Enfin, nous discuterons d'un certain nombre d'enseignements pratiques induits de notre application industrielle (§3).

1. Description du cas industriel

1.1. Description du système

Le système de refroidissement moteur est un module clé de l'environnement sous capot d'un véhicule. Il permet d'optimiser le fonctionnement du moteur (rendement, puissance, consommation, productions de particules, etc.) qui dépend, entre autre, directement de la température du moteur et de la quantité d'oxygène en admission. La température du carter moteur est régulée par le radiateur. La quantité d'oxygène en admission dépend de la pression et de la température de l'air utilisé ; si un turbo permet d'en augmenter la pression, le refroidisseur d'air de suralimentation (RAS) permet de le refroidir. Le RAS a une seconde fonction : en effet, en régulant la température d'admission d'air, on contrôle la température de combustion ce qui permet de contrôler les NOx qui sont fortement réglementés depuis la norme euro 5. Le radiateur comme le RAS permettent donc d'échanger de la chaleur du système vers l'air ambiant. Schématiquement, ils sont tous les deux composés de tubes faisant circuler le liquide ou l'air chaud et d'ailettes permettant de dissiper la chaleur à l'air ambiant (cf. [Figure 40](#)). Pour améliorer l'échange de chaleur (notamment à faible vitesse de déplacement du véhicule), la circulation d'air ambiant doit être forcée, c'est le rôle du Groupe Moto-Ventilateur (GMV). D'autres éléments complètent ces trois principales pièces (pompe, valve électronique, radiateur d'huile, recycleur de gaz d'échappement, etc) mais nous ne les prendrons pas en compte dans ce chapitre. Leur ajout ne posant aucun problème théorique, nous avons préféré rester sur un exemple facilement accessible aux lecteurs.

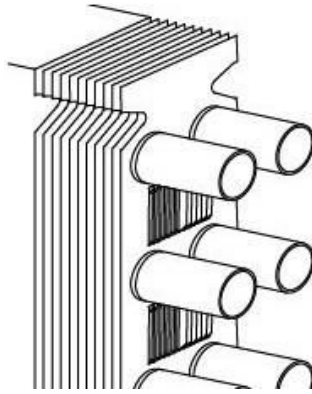


Figure 40 : Schéma de principe d'un échangeur (ici un Radiateur de type mécanique)

Ces trois ECAs (cf. Figure 41) permettent de définir un EMA : le système de refroidissement du moteur. La définition d'un module à partir de ces trois composants est pertinente vis-à-vis de la définition des modules proposés dans la troisième partie de cette thèse. En effet, ce module répond à une fonction : le refroidissement du moteur qui est défini par un nombre restreint de besoins et est testable indépendamment des autres systèmes. On peut facilement lui définir une variété restreinte d'interfaces permettant son découplage avec d'autres EMAs, les ECAs appelés sont en interaction fonctionnelle et géométrique forte les uns avec les autres, et enfin, tous ces CAs sont fabriqués par les mêmes fournisseurs.

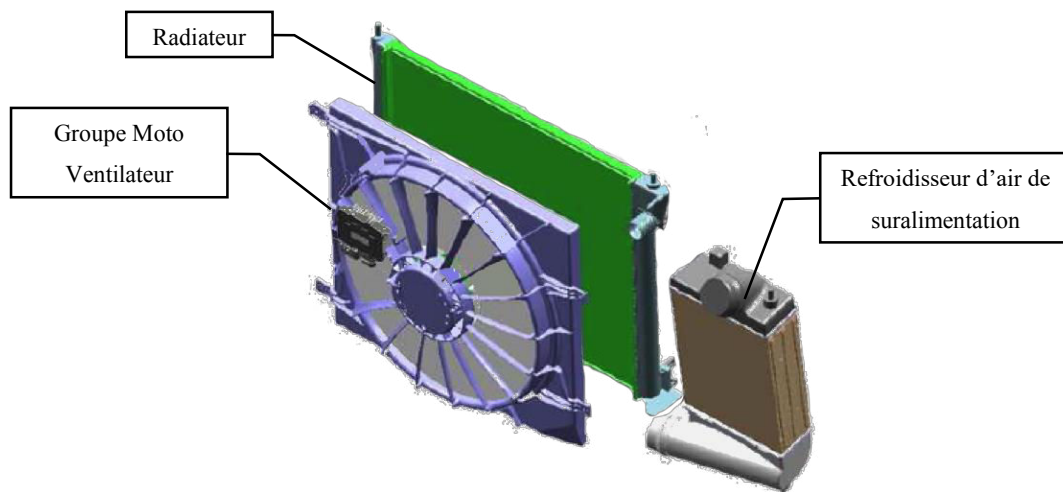


Figure 41 : Illustration de la décomposition retenue du système de refroidissement moteur

La variété de ces trois ECAs est importante. Ces diversités peuvent s'expliquer techniquement :

- Pour le radiateur : d'abord sur le plan de l'architecture, il existe trois types de RAD : soit à flux gravitationnel (down flow), soit à flux horizontal (cross flow), soit à flux en U (U flow). Ce choix dépend surtout de l'espace disponible, de la position possible des circuits de liquide de refroidissement. Ensuite sur le plan technologique,

il existe deux grandes techniques de production de RAD qui ont un impact important sur la performance du composant : soit il est mécanique (montage en force des ailettes sur les tubes), soit il est brasé (procédé d'assemblage permanent différent de la soudure car sans apport de matière extérieure). Enfin, physiquement les radiateurs peuvent aussi se différencier par des formes d'ailettes différentes, des sections de tube plus ou moins complexes, des dimensions (longueur, hauteur, profondeur) différentes et des traitements de surface anticorrosion différents. Tous ces paramètres choisis lors de la conception du composant ont un impact direct sur sa performance.

- Pour le refroidisseur d'air de suralimentation : le choix de technologie à un impact sur l'architecture. Il existe des RAS eau/air et des RAS air/air. La première technologie est plus coûteuse et plus performante (due au pouvoir calorifique de l'eau supérieur à l'air) ; elle permet de refroidir l'air avec une circulation du liquide de refroidissement. La seconde technologie fait circuler l'air de suralimentation directement dans les tubes de l'échangeur. Les RAS eau/air peuvent être implantés directement en admission et donc fixés au carter moteur (*Intake manifold*) ou déportés. Les RAS air/air peuvent, eux aussi, avoir différentes architectures d'implantation (cf. Figure 42). Enfin d'un point de vue physique, les RAS peuvent se différencier pour les mêmes raisons que les radiateurs.

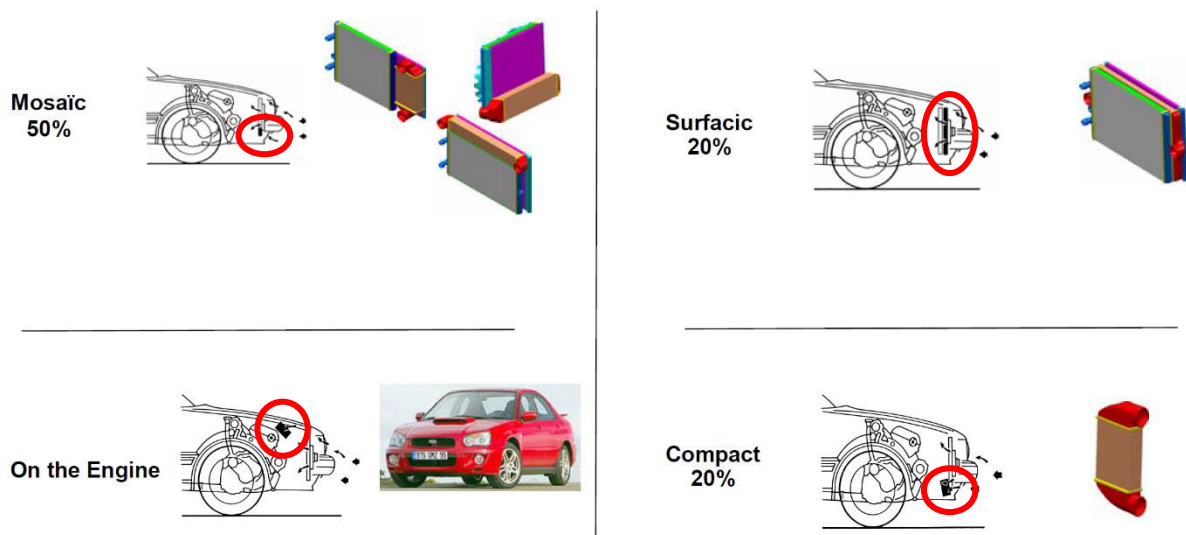


Figure 42 : Exemples d'architecture de Refroidisseur d'Air de Suralimentation de type air-air

- Pour les Groupes Moto-Ventilateur : sur le plan de l'architecture, le GMV peut être soit aspirant, il sera alors positionné entre le moteur et le radiateur, soit soufflant, il

sera alors positionné entre la structure de caisse avant et le radiateur (cf. [Figure 43](#)). Technologiquement, les GMV sont constitués d'un ou deux rotors, chacun d'eux composé d'un nombre variable d'hélices et animé par un moteur le plus souvent électrique qui peut lui-même être de plusieurs types (2 ou 4 pôles, *brushless*, etc.). Les rotors sont portés par une structure permettant de l'arrimer au radiateur qui possède souvent des éléments plastiques additionnels permettant de guider l'air. La forme géométrique du GMV, résultat de l'assemblage de l'ensemble rotor(s) + support guide d'air, est donc adaptée à la largeur et à la hauteur du radiateur.



Figure 43 : Illustration des deux architectures possibles du groupe moto ventilateur

La variété de ces ECAs et des MAs résultant de l'assemblage de 3 CAs pris chacun dans des ECAs différents est le résultat d'une diversification progressive des solutions techniques au fil des nouveaux lancements de produits. La recherche de solution optimale tant économiquement que techniquement a conduit à développer des solutions quasi particulières à chaque famille de produits. En effet, les entreprises, à l'instar de Renault, ne renouvellent pas toutes les familles de produits qu'offre la gamme en même temps (cf. Chapitre 10 §2.1.1). Il en résulte que la détermination des solutions techniques répondant à la fonction de refroidissement moteur pour différentes motorisations est contingente à la famille de produits en cours de développement. Le choix des solutions techniques est donc susceptible d'évoluer dans le temps. Notre démarche, décrite de façon théorique au chapitre précédent, prend tout son sens dans une telle organisation projet puisqu'elle apporte une optimisation économique globale en tenant compte des solutions déjà retenues précédemment.

1.2. Choix de la fonction objectif

Comme présentée de façon théorique au Chapitre 10 §2.1.1., la prise en compte du temps se fait par la modification des volumes de chaque besoin (ce sont des paramètres en amont de l'optimisation). Les demandes sont donc des sommes de prévisions annuelles actualisées sur

un horizon de cinq ans, issues de la Direction Stratégique en concertation avec la Direction Commerciale.

Les fonctions de coûts sont définies en concertation avec la Direction du Contrôle de Gestion faisant intervenir toutes les fonctions organisationnelles inhérentes aux différents cycles de vie d'une famille de produits. Dans cette étude de cas, il a été choisi de modéliser les coûts par des fonctions affines continues et non affines par morceaux comme nous le proposons au Chapitre 10 §2.2. Ce choix est motivé par l'absence de données réelles suffisamment pertinentes à notre portée. De même, les effets de synergie (cf. Chapitre 10 §2.3.1.) ne seront pas pris en compte dans ce cas d'étude.

2. Implémentation et résultats

2.1. Définition fonctionnelle et technique des Besoins, MAs et CAs

2.1.1. Définition fonctionnelle des besoins

Les besoins sont définis à une maille suffisamment agrégée pour que le Département Commercial puisse en définir directement des prévisions. De façon évidente, le commerce, qui s'exprime avec le point de vue du client, ne définit pas la référence des ECAs radiateur, refroidisseur d'air de suralimentation et groupe moto-ventilateur, il ne définit pas non plus un MA résultat de l'assemblage de ces trois ECAs. En effet, comme nous le verrons en détail plus bas, la définition du MA ou des CAs demanderait des connaissances trop techniques au client final. En revanche, un certain nombre de choix faits par le client permettent de définir de façon précise un besoin unique (cf. Partie II Chapitre 5 §3). Dans le cadre du système de refroidissement moteur, la définition d'un besoin prend en compte les trois EPAs suivants, source d'un choix par le client lors du passage de commande :

- la famille de véhicule (modèle)
- le type de motorisation (type moteur et turbo)
- le type de climatisation (chauffage simple ou climatisation)

La combinaison de trois PAs prises dans ces EPAs permet de définir une Méta-PA. Pour simplifier et pour rester homogène avec le chapitre précédent, nous ferons référence dans la suite de ce chapitre à ces méta-PAs en utilisant le terme de besoins. Pour la fonction système de refroidissement moteur, la diversité est de 390 besoins sur l'horizon étudié (cf. Figure 36). Parmi ces besoins, certaines sont commercialisés depuis longtemps, d'autres sont déjà

développés mais non commercialisés encore (le développement d'une famille de produits prend 3 ans en moyenne), enfin, d'autres sont en cadrage amont avant développement.

2.1.2. Définition technique des Modules Alternatifs

Les besoins ainsi définis peuvent être liés à une description organique du système répondant à la fonction : les MAs. Cette liaison n'est pas exprimée en phase de préconception sous la forme d'une *détermination* basée sur la définition de *prédicats* pour chaque MA (mécanisme introduit dans la Partie II Chapitre 4 §3.1). En effet, au stade de la définition de nos paramètres, la définition de prédicats est impossible et reviendrait à définir la nomenclature produits. Il est important aussi de rappeler que notre démarche de standardisation ne se base pas sur une connaissance ex ante des nomenclatures liant les CAs et les MAs. L'ensemble des MAs potentiels n'est donc pas défini par l'ensemble des combinaisons possibles de CAs des trois ECAs. La définition des MAs potentiels avant optimisation, fait appel à une traduction des besoins en fonctions techniques enveloppes (minimum et/ou maximum). Cette traduction est nécessairement le fruit d'une analyse d'experts pour les besoins en cadrage amont. Pour les autres besoins, cette traduction est simplement le résultat d'une analyse de l'existant. L'ensemble des MAs est donc l'ensemble des traductions des besoins en fonctions techniques enveloppes. Dans le cadre de notre étude de cas, ces MAs sont définis par six fonctions :

- la hauteur maximale acceptable (fonction de la famille),
- la largeur maximale acceptable (fonction de la famille),
- le type d'architecture choisi (fonction de la famille),
- la puissance calorifique minimale du radiateur (fonction de la famille et de la motorisation),
- la puissance calorifique minimale du refroidisseur d'air de suralimentation (fonction de l'architecture, de la motorisation),
- la puissance électrique minimale du groupe moto-ventilateur (fonction de l'architecture, de la motorisation, de la climatisation et des puissances minimales du radiateur et du refroidisseur d'air de suralimentation).

Le nombre de MAs caractérise alors directement le taux de recoupement technique entre les besoins. Plus le taux est faible, plus les besoins requièrent des solutions techniques différentes et donc plus la diversité optimale de MAs et de CAs sera importante. Hors de notre sujet de recherche, la question de la définition optimale des besoins et donc des PAs, c'est-à-dire de la diversité offerte aux clients, a donc un impact majeur sur la standardisation et donc sur les coûts. Dans le cadre de notre étude de cas, nous définissons 178 MAs potentiels.

2.1.3. Définition technique des Composants alternatifs

La définition des CAs est purement technique. Elle est basée sur les mêmes fonctions techniques que les MAs mais elles sont caractérisées par des valeurs précises et non des valeurs enveloppes.

- Pour les radiateurs :
 - la hauteur,
 - la largeur,
 - le type d'architecture,
 - la puissance calorifique.
- Pour les refroidisseurs d'air de suralimentation :
 - la hauteur,
 - la largeur,
 - le type d'architecture,
 - la puissance calorifique.
- Pour les groupes moto-ventilateur :
 - la hauteur,
 - la largeur,
 - le type d'architecture,
 - la puissance électrique.

Ces trois ECAs comportent respectivement 71, 40 et 61 CAs. Les contraintes de combinaison entre deux CAs appartenant à différents ECAs sont modélisées au travers de trois fonctions :

- la hauteur,
- la largeur,
- la puissance électrique (pour le groupe moto-ventilateur).

Comme évoqué dans la modélisation théorique (cf. Chapitre 10 §1.2), il est possible dans notre exemple d'utiliser un composant de jonction pour forcer les contraintes de combinaison entre deux CAs appartenant à différents ECAs. Ces composants de jonction sont ici des supports de fixation additionnels permettant de compenser des écarts de dimensions (hauteur et largeur) entre les CAs devant être fixés ensemble. L'existence ou la possibilité de définir de tels composants additionnels est issue de l'expertise de concepteurs du domaine fonctionnel.

2.2. Construction des matrices de paramètres

La construction des matrices de booléens A (une matrice liant les besoins et les MAs) et B (3 matrices liant les MAs et chaque CAs) passe alors par la définition de tables intermédiaires définissant les besoins, les MAs et les CAs comme nous l'avons illustré avec le [Tableaux 15](#) sur un exemple simple. Il faut ajouter à ces quatre matrices A et B, les trois matrices de combinaisons entre CAs et les trois matrices de possibilités de composants de jonction correspondantes. Ces matrices s'accompagnent aussi de matrices de coûts pour les MAs, les CAs et les composants de jonction et d'un tableau de volume pour les besoins.

Pour illustrer l'importance des restrictions existantes entre les besoins et les MAs ou entre les MAs et les CAs, notons que les matrices de paramètres A et B comportent de l'ordre de 96 % de valeurs nulles.

2.3. Présentation des résultats

Avec ce jeu de données, le modelleur utilisé (Xpress-IVE) a généré 11 989 variables et 10 499 contraintes pour résoudre le problème posé en quelques secondes. Le détail des données du problème et de sa solution est téléchargeable :

http://www.lamsade.dauphine.fr/~giard/Detailed_Exemple_FR.zip

La solution optimisant le coût total sur l'horizon de 5ans considéré, permet une standardisation importante aux deux niveaux de nomenclature puisqu'on passe de 178 MAs potentiels à 82, de 71 radiateurs (RAD, ECA N°1) à 24, de 40 refroidisseurs d'air de suralimentation (RAS, ECA N°3) à 15 et de 61 groupes moto-ventilateur (GMV, ECA N°2) à 23. Cette solution optimale passe par l'utilisation de composants de jonction pour 8 couples (RAD, GMV), 2 couples (RAD, RAS) et 12 couples (RAS, GMV).

Le modèle retourne non seulement la liste des MAs et des CAs retenus mais aussi la nomenclature c'est-à-dire la composition des MAs en CAs et composants de jonction (cf. tableau ci-dessous).

MA	CA de l'ECA N° 1	CA de l'ECA N° 2	CA de l'ECA N° 3	Composant de jonction_k1=1_ k2=3	Composant de jonction_k1=1_ k2=2	Composant de jonction_k2=1_ k3=2
m=3	47	40	4			
m=7	43	8	5	(43/5)		
m=8	47	40	4			
m=12	47	12	5			
m=15	47	16	4			
m=16	47	16	5			
m=17	47	15	11			(15/11)
m=21	66	16	8			(16/8)
m=22	66	16	5			
m=23	66	15	4			
m=24	66	15	5			
m=26	66	15	11			(15/11)
m=27	56	40	5			
m=28	43	40	4			
m=29	43	40	11			
m=33	43	13	8			(13/8)
m=35	43	16	8			(16/8)
m=36	43	15	11			(15/11)
m=40	69	13	8			(13/8)
m=42	69	15	11			(15/11)
m=44	70	40	13			
m=47	70	15	17			(15/17)
m=49	63	12	22			
m=50	63	16	17			(16/17)
m=51	63	15	17			(15/17)
m=52	63	15	22			
m=53	26	40	23	(26/23)		
m=55	26	19	24	(26/24)		
m=58	25	40	27			
m=62	25	24	35			
m=65	31	24	38			
m=69	29	40	35			
m=71	29	24	42			(24/42)
m=74	25	40	35			
m=76	23	40	35			
m=77	31	40	35			
m=78	39	40	34			
m=83	25	27	42			(27/42)
m=86	25	24	38			
m=88	23	24	38			
m=92	23	24	42			(24/42)
m=94	39	24	42			(24/42)
m=95	31	40	27			
m=96	31	40	35			
m=104	23	40	38			
m=106	29	40	42			
m=109	24	40	42			
m=110	23	40	42			
m=113	29	27	42			(27/42)
m=122	29	29	42			(29/42)
m=128	23	29	42			(29/42)
m=129	29	30	42			(30/42)
m=132	31	40	42			
m=133	15	40	42			
m=138	31	29	42			(29/42)
m=140	31	24	42			(24/42)
m=141	31	31	43			(31/43)
m=142	15	32	44			(32/44)
m=143	34	40	42			
m=144	38	40	42			
m=148	34	31	43			(31/43)
m=149	38	31	43			(31/43)

Figure 44 : Nomenclature générée par le modèle d'optimisation pour l'étude de cas, partie 1

MA	CA de l'ECA N° 1	CA de l'ECA N° 2	CA de l'ECA N° 3	Composant de jonction_k1=1_k2=3	Composant de jonction_k1=1_k2=2	Composant de jonction_k2=1_k3=2
m=150	34	32	44			(32/44)
m=151	38	32	44			(32/44)
m=152	9	40	59			
m=154	1	40	46			
m=155	1	40	48			
m=156	41	40	46			
m=157	41	40	48			
m=159	42	39	50	(42/50)	(42/39)	(39/50)
m=160	9	40	46	(9/46)		
m=161	9	40	50			
m=162	7	40	48			
m=163	7	40	50			
m=164	13	40	50			
m=165	13	39	50			(39/50)
m=167	7	40	50			
m=169	42	40	50	(42/50)		
m=175	42	39	56		(42/39)	
m=176	13	40	55	(13/55)		
m=177	13	36	56	(13/56)		
m=178	54	36	57	(54/57)	(54/36)	

Figure 45 : Nomenclature générée par le modèle d'optimisation pour l'étude de cas, partie 2

3. Problèmes pratiques de mise en œuvre de cette approche de standardisation

La qualité de la standardisation conjointe d'un EMA et des ECAs qu'il mobilise est conditionnée par la pertinence de l'ensemble des besoins utilisé dans le processus de standardisation. Cet ensemble de besoins doit être construit car il n'existe pas d'ensemble « général » utilisable pour n'importe quel problème de standardisation se posant dans une entreprise. Pour comprendre la difficulté de définition de cet ensemble de besoins, prenons appui sur l'exemple des constructeurs automobiles. L'offre commerciale d'une famille de véhicules, pouvant correspondre à des millions de véhicules physiquement différents, est proposée au client par le biais de configureurs. Ceux-ci permettent au client de déterminer le véhicule désiré par une combinaison limitée de prestations prises dans les quelques dizaines d'EPAs utilisés par le configureur et non par une sélection directe des MAs et/ou des CAs trop nombreux (de l'ordre de 1600 ECAs) (cf. Partie II). Cette sélection de PAs du configureur pointe vers une liste des MAs et CAs du véhicule commandé par l'intermédiaire de prédicats. Ces derniers tiennent compte des restrictions à la libre combinaison des MAs et CAs pour des raisons techniques et commerciales. L'analyse de ces prédicats permet de définir l'ensemble des besoins de standardisation avec un minimum d'arbitraire. L'introduction de nouveaux MAs et CAs dans le processus de standardisation implique une réflexion complémentaire portant sur

une explicitation des caractéristiques fonctionnelles implicitement requises par les PAs du configurateur. Cette explicitation n'est pas trop difficile à traiter par les spécialistes.

Une fois l'ensemble de besoin défini, il faut déterminer la demande associée à chaque besoin. Les prévisions s'effectuent relativement facilement au niveau des EPAs du configurateur qui fondent une segmentation commerciale voulue par la Direction Commerciale. Les choses sont plus compliquées lorsque un besoin est déterminé par plusieurs PAs du configurateur mais des solutions sont possibles (cf. Partie II Chapitre 5). Cette prévision doit être effectuée car elle est à la base de l'analyse économique de la standardisation.

Comme nous l'avons déjà vu au Chapitre 9 §1 et au Chapitre 10 §2.1, le périmètre spatial et temporel retenu pour définir les besoins a un fort impact sur la solution obtenue. En toute rigueur, il faut prendre en compte toute la diversité de besoins résultant de l'offre proposée sur l'ensemble de ces régions commerciales. Chaque usine pouvant avoir une organisation de production différente, que ce soit au niveau des processus d'assemblage, du découpage des activités entre le fournisseur et l'usine, des coûts, des disponibilités de pièces nouvelles, il est souhaitable de partitionner les besoins en autant de besoins qu'il y a de régions et de partitionner les MAs et CAs en fonction des usines les consommant. Cette définition idéale du problème de standardisation peut s'avérer très lourde à instancier, d'autant plus que le nombre d'ECAs liés par des contraintes est important. Dans l'exemple traité, cette vision globale a été possible assez facilement car les besoins et les solutions techniques ne diffèrent pas d'une région et d'une usine à l'autre et que le nombre d'ECAs liés était raisonnable.

À la fois, pour des questions organisationnelles et pour des questions pratiques de structuration des bases de données, la recherche des CAs existants peut être extrêmement chronophage voire impossible. Les principaux freins organisationnels proviennent d'une organisation en silos par famille de produits qui est amplifiée par la régionalisation des équipes en charge du développement. Compte tenu de la diversité très importante de produits et de composants, les systèmes d'information sont eux aussi structurés en silos en utilisant la famille de produits comme une clé primaire. Dans bien des cas, la génération d'un nouveau CA s'avère alors plus rapide que la recherche et l'étude des CAs existants, ce qui contribue à la génération de diversité. Aussi dans l'organisation en « V » des nouveaux projets, la définition sans contrainte par le marketing, des caractéristiques fonctionnelles d'une nouvelle famille de produits à l'étude, génère mécaniquement en aval pour les concepteurs, des cahiers des charges imposant souvent la conception d'un nouveau CA.

Enfin, il est intéressant de souligner qu'en pratique, certains choix stratégiques d'organisation de la chaîne logistique peuvent freiner la standardisation. C'est typiquement le cas des décisions d'externalisation de la conception de certains modules dont les composants pâtissent alors d'une optimisation locale par les sous-traitants. C'est par exemple le cas des moteurs électriques utilisés dans différents modules tels que ceux de lève-vitres, d'essuie-glaces, de réglages de siège, d'ouverture de coffre, d'ouverture de porte latérale etc.

Nous avons dans l'analyse de la littérature (cf. Chapitre 9) que de nombreux travaux définissent les besoins que par une seule fonction. En réalité, le niveau de performance d'un besoin est souvent plus complexe.

La généralisation de la standardisation à une analyse multicritères est possible.

- Soit par un retour à un problème monocritère moyennant l'usage d'un proxy (i.e. une fonction de synthèse). Ce proxy peut être un critère ou une combinaison linéaire de critères permettant de tenir compte d'une potentielle interdépendance des fonctions (poids/résistance, qualité des matériaux/coûts etc.).
- Soit par une optimisation directe à n dimensions qui permet de visualiser l'éventuelle interdépendance des fonctions.
- Soit par une succession d'optimisations monocritères. L'ordre des optimisations impacte alors la solution retenue et ce d'autant plus si les critères ne sont pas orthogonaux.

La standardisation multicritère pose donc une question stratégique puisque au travers de l'optimisation et/ou de la combinaison linéaire des fonctions sont définies des règles de compromis qu'il ne faut pas sous-estimer.

- D'abord parce que, chaque variante retenue se définit par un n -uplets fixant un niveau de prestation par fonction ; en cherchant l'optimum global, la standardisation risque de dégrader pour certains de ces critères le niveau de prestation. Une entreprise mettant en place ou accentuant une démarche de standardisation doit donc être consciente des choix qu'elle opère. D'autant plus qu'un choix de standardisation est par définition durable dans le temps.
- Ceci est renforcé lorsque l'on cherche à faire de la standardisation sans reconcevoir les variantes. En effet, en optimisation multicritère il est peu probable qu'un composant existant soit déjà le meilleur selon toutes les fonctions sinon il serait déjà utilisé partout.

- Enfin, souvent, les chercheurs font l'hypothèse que les niveaux de besoins sont « cumulatifs croissants » (pour un critère donné le niveau $n+1$ est plus exigeant et inclus le niveau n). C'est le cas si les niveaux sont définis en fonction d'une seule fonction ou si les fonctions sont indépendantes (cf. graphe de gauche de la Figure 46, où chaque + définit un composant selon deux fonctions). Dans le cadre d'une standardisation d'un composant dont le besoin est défini par plusieurs fonctions non indépendantes cette hypothèse doit être remise en cause. Ce cas de figure génère en pratique des compromis de conception qui revêt un caractère stratégique pour l'entreprise. En effet, il peut arriver que la définition d'un composant standard nuise à la performance propre de chaque produit fini l'utilisant (exemples : résistance versus rigidité, poids versus coût etc.). Chaque produit peut alors être moins performant que l'ancien. Par exemple dans le graphe de droite de la Figure 46, les composants (représenté par des +) ne permettent pas de définir a priori le meilleur composant à choisir pour remplacer les autres.

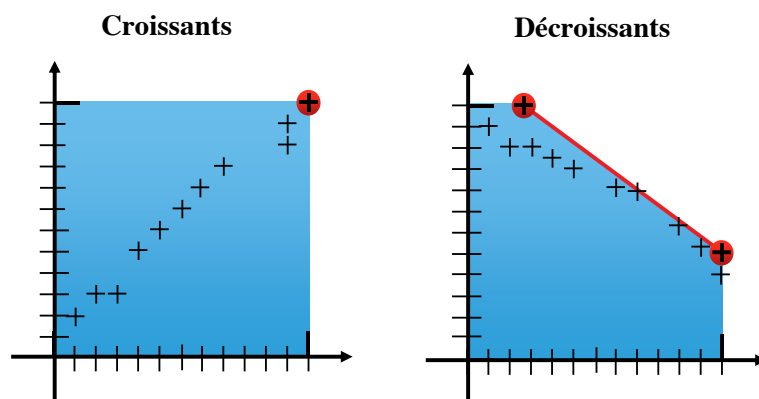


Figure 46 : Compromis en optimisation multicritères

Conclusion de la Partie IV

La démarche de standardisation multi-niveaux proposée présente plusieurs avantages par rapport aux démarches antérieures. Elle s'appuie sur un point de vue multifonctionnel pour définir les besoins, les modules alternatifs et les composants alternatifs, qui est facilement utilisable par les opérationnels. Elle permet une standardisation conjointe des modules et de tous les composants qu'ils incluent, tenant compte des incompatibilités d'interfaçage et de la possible utilisation de composants de jonction ; la nomenclature est un résultat de ce processus d'optimisation. Ces ensembles peuvent intégrer des composants (ou modules) existants mais aussi d'autres envisagés en conception. Notons aussi que le modèle proposé ici avec deux niveaux de nomenclature peut être généralisé en passant à un nombre supérieur de niveaux de nomenclature. La définition des besoins peut s'effectuer à une maille suffisamment agrégée, celle des prestations alternatives utilisée par les configureurs, pour que les prévisions de demande soient pertinentes. Enfin la modélisation économique permet de tenir compte de dimensions spatiales et temporelles, cruciales sur le terrain.

Ce modèle de rationalisation est propice à être instancié dans les phases de développement lors de renouvellement de gamme. Il nécessite des informations économiques disponibles à un stade avancé dans le développement des modules alternatifs et des composants alternatifs. Généralement, et c'est encore plus vrai avec les approches modulaires, à ce stade les organisations sont telles que les métiers sont très spécialisés ce qui rend complexe une approche complète tenant compte des interdépendances entre modules. La question de l'organisation pertinente permettant une gestion de la diversité la plus juste possible au regard de l'ensemble de la gamme de produits nous apparaît donc être une question de fond que de futurs travaux devront explorer.

Conclusion Générale

La personnalisation de masse est le paradoxe des entreprises de production modernes. Les entreprises veulent d'un côté proposer toujours plus de produits finis pour essayer d'accroître leurs parts de marché. Elles veulent d'un autre côté limiter les investissements nécessaires pour offrir cette diversité de produits finis. La diversité commerciale est historiquement conçue par familles de produits finis. Une grande diversité commerciale conduit alors à une diversité technique importante de composants qu'il faudra gérer en production et en conception. La diversité de produits finis est alors obtenue par la combinaison de variantes alternatives de composants qui semble être la seule solution pour permettre la production de masse d'une grande diversité de produits finis. Dans le secteur automobile, la complexité du produit conduit à une interdépendance de ces composants. La personnalisation de masse conduit alors dans ce secteur à une complexité de la diversité interne qui est à la base de nombreuses difficultés au niveau opérationnel qui ont largement fait l'objet de travaux de recherche.

Sans remettre en cause tous les travaux cherchant à solutionner les nouvelles problématiques apparaissant avec l'augmentation de la diversité externe, le but de notre travail de recherche a été d'étudier les possibilités de réduire à la racine les problématiques de gestion qui semblent inhérentes à la personnalisation de masse. Le travail de recherche effectué à la demande de Renault et restitué dans cette thèse s'inscrit donc dans la problématique générale de la gestion de la diversité dans un contexte de production de masse. Dans ce travail de recherche, nous avons voulu comprendre les mécanismes possibles de dissociation de la diversité externe, de la diversité interne et de leurs impacts sur la gestion de la chaîne logistique dans un contexte de personnalisation de masse. Nous avons articulé notre réflexion autour de trois questions clés. Comment peut-on décrire la diversité de produits et de composants ? Comment simplifier la diversité interne ? Comment réduire la diversité interne ? Notre travail s'est réalisé en quatre grandes étapes qui expliquent la structure de cette thèse et que nous résumons dans les quatre paragraphes suivants.

Dans un premier temps, nous avons voulu positionner la problématique et préciser le cadre industriel. Cette première partie nous a permis d'analyser en détail le concept de diversité. En effet, puisque la diversité peut être mesurée à des niveaux de besoins ou de solutions techniques différents, c'est une notion polysémique. En fait, la diversité est une notion contingente associée à un point de vue. Il nous a alors semblé essentiel de comprendre les nuances de chaque sens

donné à cette notion de diversité. Ces écarts de sens ont des impacts directs au niveau opérationnel puisque tous les métiers d'une entreprise n'ont pas la même maille d'analyse de la diversité.

La multiplicité des points de vue sur la diversité nous a conduits dans un second temps à nous interroger sur les possibilités pour les entreprises de définir un outil unique de représentation, c'est-à-dire une unique nomenclature. Dans les entreprises fabriquant des produits très diversifiés, la nomenclature ne peut plus simplement être structurée de manière individuelle pour chaque produit fini. Dans le contexte d'une personnalisation de masse, caractérisé par d'importantes restrictions dans la combinaison des nombreux composants alternatifs assurant cette diversité, la construction et l'usage des nomenclatures posent de redoutables problèmes méthodologiques. Dans cette thèse, nous avons alors théorisé la pratique de certains constructeurs dont Renault et qui consiste à dissocier la description commerciale et la description technique de la diversité. Le produit fini est alors défini par une combinaison de prestations alternatives correspondant à des caractéristiques fonctionnelles compréhensibles par le client et utilisables par la Direction Commerciale. Cette approche permet de créer la liste des composants alternatifs d'un produit fini à partir de prédicats utilisant les prestations alternatives retenues dans la définition du produit fini. Nous avons alors montré l'impact opérationnel de cette description de la diversité sur la gestion des approvisionnements.

En fait, la personnalisation de masse, pour être possible, demande aux entreprises de trouver une façon de maximiser la diversité offerte au niveau des produits finis tout en simplifiant la diversité des composants les constituant. Ce constat nous a alors conduits à introduire dans un troisième temps, la modularité de produits. Cette approche est en rupture avec les architectures intégrées classiquement employées jusque-là. Elle se base sur une réflexion sur la gamme transversale aux produits dès les premières phases de développement et vise à rendre chaque fonction et chaque système y répondant indépendant des autres. Par la standardisation des interfaces entre modules, la modularité peut réduire sensiblement le nombre de contraintes techniques à l'origine de la complexité de la diversité interne. La modularité de produits, qu'elle soit de conception ou de production, passe par la définition d'une architecture particulière du produit. Cette démarche est donc éminemment une démarche de conception mais a des impacts dans toutes les phases du cycle de vie du produit. Comme nous l'avons montré en comparant la modularité décrite dans la littérature et la modularité mise en place par Renault, la mise en place d'une modularité de produits nécessite un changement organisationnel. La modularité organisationnelle permise par la définition d'une architecture modulaire nous semble alors

nécessaire pour quitter à la fois l'organisation en silos des projets de familles de produits et l'organisation en silos des métiers de la Direction de la R&D. La définition d'une organisation modulaire en conception et en production peut alors avoir un impact sur la répartition des activités entre donneurs d'ordres et sous-traitants en permettant l'externalisation de tâches plus complexes. Nous avons alors discuté de l'importance de cette logique dans l'automobile et de la possibilité de voir un jour un changement de rapport de force dans la chaîne logistique encore dominée par les firmes donneurs d'ordres. Cette discussion permet aux managers en charge de la mise en place d'une démarche modulaire de rapidement comprendre les enjeux stratégiques des choix qu'ils prendront.

Enfin dans la quatrième partie de notre travail, nous avons voulu étudier les moyens de réduction de la diversité interne. Cette rationalisation s'appuie sur une démarche de standardisation. La définition d'une architecture modulaire, en limitant les contraintes entre modules, propose un cadre propice à de telles réflexions. Les modules étant des composants complexes, la standardisation ne peut plus se faire comme autrefois selon un seul paramètre. De plus, la standardisation des variantes alternatives de chaque composant ne peut pas se faire de manière indépendante des choix de standardisation sur les autres à cause de l'existence de contraintes internes entre composants appartenant à un module. Ce constat nous a poussés à proposer un modèle de standardisation prenant en compte simultanément la standardisation d'un ensemble de modules alternatifs et de tous les ensembles de composants alternatifs les constituant. La démarche de standardisation multi-niveaux proposée présente alors plusieurs avantages par rapport aux démarches antérieures. Elle s'appuie sur un point de vue multifonctionnel pour définir les besoins, les modules et les composants, qui est facilement utilisable par les opérationnels. Elle permet une standardisation conjointe des modules et de tous les composants qu'ils incluent, tenant compte des incompatibilités d'interfaçages et de la possible utilisation de composants de jonction. Notons aussi que le modèle proposé ici avec deux niveaux de nomenclature peut être généralisé en passant à un nombre supérieur de niveaux de nomenclature. La définition des besoins peut s'effectuer à une maille suffisamment agrégée, celle des prestations alternatives utilisée par les configurateurs pour que les prévisions de demande soient pertinentes. Enfin, la modélisation économique permet de tenir compte de dimensions spatiales et temporelles, cruciales sur le terrain.

On observe chez Renault une localisation de plus en plus forte des approvisionnements à proximité des usines d'assemblage. Cette stratégie permet de progressivement quitter une organisation souvent mono-fournisseur qui favorisait les coûts d'achat au prix d'une

augmentation de la complexité en logistique à maintenir des organisations en production à la commande. La régionalisation des approvisionnements est aujourd'hui rendue possible par la maturité acquise par les fournisseurs et par la mondialisation des fournisseurs historiques. Cette localisation des approvisionnements tend à rendre autonome la chaîne logistique de chaque région de production. Les décisions de types *make or buy* sont donc décidées région par région aboutissant à des mailles de composants en entrée d'usines différentes d'une usine à une autre même lorsqu'elles produisent la même diversité de véhicules. La diversité en production est donc en train de se régionaliser. Au niveau stratégique, la mise en place de la modularité, qui cherche à définir un cadre rigide à l'architecture produit, peut alors impacter et être impactée par cette nouvelle organisation de la chaîne logistique. Il serait alors intéressant dans le cadre de futurs travaux de gestion de questionner la mise en place à la fois d'une approche modulaire et d'une régionalisation.

Enfin, depuis quelques années, on observe une certaine prise de conscience des constructeurs automobiles des impacts négatifs d'une trop grande diversité. Parfois, certains constructeurs réduisent la diversité offerte aux clients par des logiques de packs ou de suréquippements. Ces tendances semblent en Europe principalement venir des constructeurs asiatiques et notamment coréens. La logique *low-cost* a aussi fait son apparition ces dernières années et moyennant une baisse des niveaux de prestations offerts aux clients, cette stratégie permet aussi de produire des véhicules moins diversifiés. Il serait alors aussi intéressant que de futurs travaux s'intéressent à définir le véritable niveau de diversité commerciale nécessaire au vu de la complexité qu'elle génère.

Bibliographie

- Abreu, A.R. de P., Beynon, H., Ramalho, J.R., 2000. The Dream Factory': VW's Modular Production System in Resende, Brazil. *Work, Employment & Society* 14, no. 2 : 265–82.
- Agard, B., 2002. Contribution à une méthodologie de conception de produits à forte diversité. Thèse de Doctorat de l'*Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG*. <http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/04/74/01/PDF/tel-00007637.pdf>.
- Agard, B., Bassetto, S., 2013. Modular Design of Product Families for Quality and Cost. *International Journal of Production Research* 51 (6): 1648–67. doi:10.1080/00207543.2012.693963.
- Agard, B., Penz, B., 2009. A Simulated Annealing Method Based on a Clustering Approach to Determine Bills of Materials for a Large Product Family. *International Journal of Production Economics* 117 (2): 389–401. doi:10.1016/j.ijpe.2008.12.004.
- Agard, B., Tollenaere, M., 2002. Conception d'assemblages pour la customisation de masse. *Mécanique & Industries* 3 (2): 113–19.
- Agrawal, A., 2009. Product networks, component modularity and sourcing. *Journal of technology management & innovation* 4 (1): 59-81.
- Albano, L.D., Suh, N.P., 1994. Axiomatic design and concurrent engineering. *Computer-Aided Design* 26 (7): 499-504.
- Alblas, A, Zhang, L.L., Wortmann, H., 2012. Representing Function-Technology Platform Based on the Unified Modelling Language. *International Journal of Production Research* 50(12):3236-3256.
- Aydin, A.O., Güngör, A., 2005. Effective relational database approach to represent bills-of-materials. *International Journal of Production Research*, vol. 43, n° 6, p. 1143-1170
- Baldwin, C.Y., Clark, K.B., 1997. Managing in an Age of Modularity. *Harvard Business Review*.
- Baldwin, C.Y., Clark, K.B., 2006. Modularity in the design of complex engineering systems (Harvard Business School). Boston, MA 02163: Springer.

- Baldwin, C.Y., Clark, K.B., 2000. *Design rules: The power of modularity*. Vol. 1. Cambridge, Massachusetts: MIT press.
- Baud-Lavigne, B., Agard, B. Penz, B., 2012. Mutual Impacts of Product Standardization and Supply Chain Design. *International Journal of Production Economics* 135 (1): 50–60. doi:10.1016/j.ijpe.2010.09.024.
- Behr, N., 2004. Distribution de la variété: incertitude sur la demande et relations verticales dans l'industrie automobile. *Thèse de Doctorat de École Nationale Supérieure des Mines de Paris*. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00001250/>.
- Bertrand, J.W.M., Zijderwijk, M., Hegge, H.M.H., 2000. Using hierarchical pseudo bills of material for customer order acceptance and optimal material replenishment in assemble to order manufacturing of non-modular products. *International Journal of Production Economics*, 66(2):171-184.
- Brusoni, S., Prencipe, A., 2001. Unpacking the black box of modularity: technologies, products and organizations. *Industrial and Corporate Change*, 10(1), 179–205.
- Cabigiosu, A., Zirpoli, F., Camuffo, A., 2013. Modularity, interfaces definition and the integration of external sources of innovation in the automotive industry. *Research Policy*, 42(3), 662-675. doi : 10.1016/j.respol.2012.09.002
- Camisullis, C., 2008. *Les déterminants de la capacité d'une chaîne logistique amont*. Thèse en sciences de gestion, l'Université Paris-Dauphine.
- Camisullis, C., Giard, V., Mendy-Bilek, G., 2010. The information to share in upstream supply chains dedicated to mass production of customized products for allowing a decentralized management. *Cahier du LAMSADE*, 296.
- Campagnolo, D., Camuffo, A., 2010. The concept of Modularity in Management Studies : A literature Review. *International Journal of Management Reviews*
- Camuffo, A., 2000. Globalization, Outsourcing and Modularity in the Auto Industry. *Working paper*
- Catel, F., Monateri, J.C., 2007. Modularité et dynamique des relations durables entre entreprises: le cas des produits et systèmes complexes. *Colloque Analyse(s) et transformation (s) de la firme: confrontation entre économistes, gestionnaires et juristes*,

LEFI, Laboratoire d'Economie de la Firme et des Institutions, ISH, Institut des Sciences de l'Homme, Université Lumière Lyon 2, Lyon, 22-23 novembre 2007.

<https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00217607/>.

Chatras, C. Giard, V., 2015 (c). Standardization, Commonality, Modularity: a Global Economic Perspective. In *Advances in Production Management Systems: Innovative Production Management Towards Sustainable Growth*, Springer International Publishing: 365-374.

Chatras, C., Giard V., Sali, M., 2015 (a). High variety impacts on Bill of Materials Structure: Carmakers case study. In *15th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM 2015, IFAC-PapersOnLine*, 48 (3): 1067-1072

Chatras, C., Giard V., Sali, M., 2015 (b). High variety impacts on Master Production Schedule: a case study from the automotive industry. In *15th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM 2015, IFAC-PapersOnLine*, 48 (3): 1073-1078

Chatras, C., Giard, V., 2014. Economic variety control and modularity. In *ILS'5 conference in Breda, Netherlands*. <http://basepub.dauphine.fr/xmlui/handle/123456789/15011>.

Chen, K.M., Liu, R.J., 2005. Interface strategies in modular product innovation. *Technovation*. vol. 25, no. 7, pp. 771–782.

Childerhouse, P., Disney, S.M., Towill, D.R., 2008. On the impact of order volatility in the European automotive sector, *International Journal of Production Economics*, 114(1): 2-13.

Chrisment, C., Pinel-Sauvagnat, K., Teste, O., Tuffery, M., 2008. *Bases de données relationnelles*, Hermes, Paris.

Chung M., 2002. The Way of Modularization Strategy by Hyundai. Dixième Rencontre International Du GERPISA. In *Tenth GERPISA International Colloquium* (p. 6–8).

Ciciliot, F., 2012. Les chantiers navals en Ligurie du Moyen Âge à l'époque moderne (XIIe - XVIe siècles), Cahiers de la Méditerranée, n°84, <http://cdlm.revues.org/6481>.

Ciravegna, L., Romano, P., Pilkington, A., 2013. Outsourcing Practices in Automotive Supply Networks: An Exploratory Study of Full Service Vehicle Suppliers. *International Journal of Production Research* 51 (8): 2478-90. doi:10.1080/00207543.2012.746797.

Collins, R., Bechler, K., Pires, S., 1997. Outsourcing in the automotive industry: from JIT to modular consortia. *European management journal* 15 (5): 498-508.

Corrêa, H.L., 2001. The VW Resende (Brazil) plant modular consortium SCM model after 5 years of operation. In *Proceedings of the International Conference of the Operations Management Society, Orlando, Fla.*

<http://pomsmeetings.org/Meeting2001/2001/cd/papers/pdf/Correa.pdf>.

Da Cunha, C., 2004. Définition et gestion de produits semi-finis en vue d'une production de type assemblage à la commande. *Thèse de Doctorat à l'Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG*. <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00007163/>.

Dahmus, J.B., Gonzalez-Zugasti, J.P., Otto, K.N., 2001. Modular Product Architecture. *Design Studies* 22 (5): 409–24.

Date, C. J., 2012. *Database Design and Relational Theory*, O'Reilly, Sebastopol (CA).

Davies, J., Joglekar, N., 2013. Supply chain integration, product modularity, and market valuation: Evidence from the solar energy industry. *Production and Operations Management* 22 (6): 1494-1508.

Dupont, L., Cormier, G., 2001. Standardisation D'une Famille Ordonnée de Composants Dont Le Coût D'obtention Est Concave. In *MOSIM'01*, 509–13. Consulté à l'adresse <http://www1.utt.fr/mosim01/pdf/ARTICLE-137.pdf>.

Eastman, C. M., 2012. *Design for X: concurrent engineering imperatives*. Springer Science & Business Media. Consulté à l'adresse :

https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=g_r1CAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR10&dq=Design+for+X+Concurrent+engineering+imperatives&ots=zqjT_HbVv-&sig=jze3oDoPTlekypgFx5ybrAzPy14

Eggen, O., 2003. Modular product development. *Article as a part of product design course at the Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway*.

Erens, F., Verhulst, K., 1997. Architectures for product families. *Computers in industry*. 33, pp. 165-178.

Erens, F., McKay, A., Bloor, S., 1994. Product Modelling Using Multiple Levels of Abstraction Instances as Types. *Computers in Industry* 24 (1): 17–28.

- Erens, F., Wortman, H.C., 1996. Generic Product Modeling for Mass Customization. *Implementation Road Map 96*.
- Erens, F.J., Hegge, H.M.H., 1994. Manufacturing and Sales Co-Ordination for Product Variety. *International Journal of Production Economics* 37 (1): 83–99.
- Ericsson, A., Erixon, G., 1999. *Controlling design variants: modular product platforms*. Society of Manufacturing Engineers.
- Ethiraj, S.K., Levinthal, D., 2004. Modularity and innovation in complex systems. *Management Science*, 50(2), 159–173.
- Ethiraj, S.K., Levinthal, D., Roy, R.R., 2008. The dual role of modularity: innovation and imitation. *Management Science*, 54(5), 939–955.
- Evans, D.H., 1963. Modular design-A special case in nonlinear programming. *Operations Research*, 11(4), 637–647.
- Feng, T., Zhang, F., 2014. The impact of modular assembly on supply chain efficiency. *Production and Operations Management*, 23(11), 1985–2001.
- Fine, C.H., 1998. *Clockspeed: Winning industry control in the age of temporary advantage*. Basic Books.
- Fisher, M.L., Ittner, C.D., 1999. The Impact of Product Variety on Automobile Assembly Operations: Empirical Evidence and Simulation Analysis. *Management Science*, Vol. 45, n° 6, pp. 771-786.
- Fisher, M.L., Ramdas, K., Ulrich, K., 1999. Component Sharing in the Management of Product Variety: A Study of Automotive Braking Systems. *Management Science* 45 (3): 297–315.
- Fonte, W.G., 1994. A de-Proliferation Methodology for the Automotive Industry. PhD Thesis at *Massachusetts Institute of Technology*. <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/12064>.
- Fouque, T., 1997. *Impact de la réduction de la diversité des produits sur les stocks*. Thèse de Doctorat en Gestion à l'Université Paris 10.
- Fredriksson, P., 2006. Mechanisms and rationales for the coordination of a modular assembly system: The case of Volvo Cars. *International Journal of Operations & Production Management*, 26(4), 350–370.

- Frigant, V., 2007. L'impact de la production modulaire sur l'approfondissement de la Division Internationale des Processus Productifs (DIPP). *Revue d'économie politique*, 117(6), 937–961.
- Frigant, V., 2013. Une comparaison de l'internationalisation des chaînes d'approvisionnement automobiles allemande et française. In *Troisième Congrès de l'AFEP* (Vol. 9, p. 2013–09).
- Consulté à l'adresse <http://afep2013.gretha.u-bordeaux4.fr/IMG/pdf/frigant-afep2013.pdf>
- Frigant, V., Lung, Y., 2002. Geographical proximity and supplying relationships in modular production. *International Journal of Urban and Regional Research*, 26(4), 742–755.
- Frigant, V., Talbot, D., 2004. Convergence et diversité du passage à la production modulaire dans l'aéronautique et l'automobile en Europe. *Actes du GERPISA*, 2004(37), 107–118.
- Fujita, K., Sakaguchi, H., Akagi, S., 1999. Product variety deployment and its optimization under modular architecture and module commonalization. In *Proceedings of the 1999 ASME design engineering technical conferences* (p. 12–15). Consulté à l'adresse http://syd.mech.eng.osaka-u.ac.jp/papers/1999/09_ASME_DFM/dfm-8923.pdf
- Galvin, P., Morkel, A., 2001. The effect of product modularity on industry structure: the case of the world bicycle industry. *Industry and Innovation*. 8, pp. 31–47.
- Garwood, D., 1995. *Bills of Materials - Structures for Excellence*. 5e ed, Dogwood Publishing Company, Marietta G.A
- Gautier, F., Giard, V., 2000. Vers une meilleure maîtrise des coûts engagés sur le cycle de vie, lors de la conception de produits nouveaux. *Comptabilité, Contrôle, Audit*, tome VI, Vol. 2, p. 43-75.
- Gershenson, J. K., Prasad, G. J., Zhang, Y., 2003. Product modularity: Definitions and benefits. *Journal of Engineering Design*, 14(3), 295-313.
- DOI 10.1080/0954482031000091068
- Gershenson, J. K., Prasad, G. J., Zhang, Y., 2004. Product modularity: measures and design methods. *Journal of Engineering Design*, 15(1), 33-51. DOI 10.1080/0954482032000101731
- Giard, V., 1983, 1988, 2003. *Gestion de la production et des flux*. 3e ed., 1229 pages, Economica.

- Giard, V., 1999. Analyse Économique de La Standardisation Des Produits. *Cahier de Recherche Du GREGOR*. <http://www.gregoriae.com/dmdocuments/1999-13.pdf>.
- Giard, V., Camisullis, C., 2010. Détermination des stocks de sécurité dans une chaîne logistique-amont dédiée à une production de masse de produits fortement diversifiés. *Journal Européen des Systèmes Automatisés (APII-JESA)* 44: 975-1010.
- Giard, V., Jeunet, J., 2006. Modélisation du problème général d'ordonnancement de véhicules sur une ligne de production et d'assemblage. *Journal Européen des Systèmes Automatisés (APII-JESA)*, vol 40, n° 4-5/2006, p. 463-496
- Giard, V., Sali, M., 2012. Pilotage d'une chaîne logistique par une approche de type MRP dans un environnement partiellement aléatoire. *Journal Européen des Systèmes Automatisés (APII-JESA)*, vol 46, n° 1, p. 73-102.
- Giard, V., 2001. Economical analysis of product standardization. *IFAC/IFIP/IEEE 2000*, in (Binder ed.), Elsevier.
- Gonzalez-Zugasti, J. P., 2000. *Models for platform-based product family design*. Massachusetts Institute of Technology. Consulté à l'adresse : <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/9300>
- Gonzalez-Zugasti, J. P., Otto, K. N., Baker, J. D., 2000. A method for architecting product platforms. *Research in Engineering Design*, 12(2), 61–72.
- Hadj-Hamou, K., 2002. *Contribution à la conception de produits à forte diversité et de leur chaîne logistique : une approche par contraintes*. Thèse de Doctorat à L'institut National Polytechnique De Toulouse.
- Haug, A., Hvam, L., Mortensen, N.h., 2012. Definition and evaluation of product configurator development strategies. *Computers in Industry*, vol. 63, n°5, p. 471-481
- Hegge, H.M.H., 1992. A Generic Bill-of-Material Processor Using Indirect Identification of Products. *Production Planning & Control* 3 (3): 336–42.
- Hegge, H.M.H., Wortmann, J.C., 1991. Generic bill-of-material: a new product model. *International Journal of Production Economics*, 23(1–3): 117-128.
- Helo, P.T., Xu, Q.L., Kyllönen, S.J., Jiao, R.J., 2010. Integrated Vehicle Configuration System—Connecting the domains of mass customization. *Computers in Industry*, vol. 61, n° 1, p. 44-52.

- Hoetker, G., Swaminathan, A., Mitchell, W., 2007. Modularity and the impact of buyer-supplier relationships on the survival of suppliers. *Management Science*, 53(2), 178–191.
- Huang, C.-C., Kusiak, A., 1998. Modularity in design of products and systems. *Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on*, 28(1), 66–77.
- ISO (International Standard Organization), 2004, Standardization and related activities - General vocabulary, http://www.iso.org/iso/fr/iso_iec_guide_2_2004.pdf.
- Jiao, J., Tseng, M.M., Ma, Q., Zou, Y., 2000. Generic Bill-of-Materials-and-Operations for High-Variety Production Management. *Concurrent Engineering: research and applications*, 8(4): 297-321.
- Jose Flores, A., 2005. *Contribution aux méthodes de conception modulaire de produits et processus industriels*. Thèse de Doctorat à l'Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble.
- Jose Flores, A., Tollenaere, M., 2005. Modular and platform methods for product family design: literature analysis. *Journal of Intelligent manufacturing*, 16(3), 371–390.
- Keha, A.B.; de Farias Jr., I.R.; Nemhauser, G.L, 2004. Operations Research Letters. Jan2004, Vol. 32 Issue 1, p44-48.
- Kendall, M.G., 1976. *Time series*, Griffin, London
- Krishnan, V., Gupta, S., 2001. Appropriateness and impact of platform-based product development. *Management Science*, 47(1), 52–68.
- Lamothe, J., Hadj-Hamou, K., Aldanondo, M., 2006. An Optimization Model for Selecting a Product Family and Designing Its Supply Chain. *European Journal of Operational Research* 169 (3): 1030–47. doi:10.1016/j.ejor.2005.02.007.
- Lamouri, S., Thomas, A., 2000. The two level master production schedule and planning bills in a just in time MRP context. *International Journal of Production Economics*. 64, pp. 409-415
- Langlois, R.N., 2002. Modularity in technology and organization. *Journal of economic behavior & organization*, 49(1), 19–37.
- Lau, A.K., Yam, R.C., Tang, E.P., Sun, H.Y., 2010. Factors influencing the relationship between product modularity and supply chain integration. *International Journal of Operations & Production Management*, 30(9), 951–977.

- Lesert, A., 2006. *Evaluation de la flexibilité de l'atelier montage d'une usine terminale automobile*. Thèse de Doctorat, INPG.
- Loch, C.H., Terwiesch, C., Thomke, S., 2001. Parallel and sequential testing of design alternatives. *Management Science*, 47(5), 663–678.
- MacDuffie, J.P., Helper, S., 2006. Collaboration in supply chains, With and without trust. In *The Corporation as a Collaborative Community* (Heckscher & Alder, Vol. 10, p. 417-466).
- MacDuffie, J.P., Sethuraman, K., Fisher, M.L., 1996. Product variety and manufacturing performance: evidence from the international automotive assembly plant study. *Management Science*, 42(3), 350–369.
- Martin, M.V., Ishii, K., 1997. Design for variety: development of complexity indices and design charts. In *Proceedings of 1997 ASME Design Engineering Technical Conferences* (p. 14–17). Springer-Verlag. Consulté à l'adresse : http://me317.stanford.edu/twiki/pub/ME317AdminWeb/ME317CourseReaderDFVProductStructureGraph/aa19.rdr317a.dfv_.pdf
- Martin, M.V., Ishii, K., 2000. Design for variety: a methodology for developing product platform architectures. In *ASME Design for Manufacturing Conference*. Consulté à l'adresse <http://alvarestech.com/temp/PDP2011/CDAndrea/Gerenciamento%20da%20arquitetura%20do%20produto/ferramenta/VARIEDADE%20ISHI%202000.pdf>
- Martin, M.V., Ishii, K., 2002. Design for Management and Control of Production and Logistic Variety: Developing Standardized and Modularized Product Platform Architectures. *Research in Engineering Design* 13 (4): 213–35.
- Marx, R., Zilbovicius, M., Salerno, M.S., 1997. The modular consortium in a new VW truck plant in Brazil: new forms of assembler and supplier relationship. *Integrated Manufacturing Systems*, 8(5), 292–298.
- Mather, H.F., 1986. Design, Bills of Materials, and Forecasting—the Inseparable Threesome. *Production and Inventory Management Journal* 27 (1): 90–107.
- Mendy-Bilek, G., 2007 Apport de la production synchrone dans l'amélioration du pilotage de la production sur une chaîne logistique. *Thèse de Doctorat en sciences de gestion*, l'Université Paris-Dauphine.
- Meyer, M.H., Lehnerd, A.P., 1997. *The power of product platforms*. Simon and Schuster.

- Midler, C., 1993. *L'auto qui n'existait pas, management des projets et transformation de l'entreprise*. InterÉditions.
- Mikkola, J.H., 2003. Modularity, component outsourcing, and inter-firm learning. *R&D Management*, 33(4), 439–454.
- Mikkola, J.H., Gassmann, O., 2003. Managing modularity of product architectures: toward an integrated theory. *Engineering Management, IEEE Transactions on*, 50(2), 204–218.
- Miller, T. D., Elgard, P., 1998. Defining modules, modularity and modularization. In *Proceedings of the 13th IPS Research Seminar, Fuglsoe*. Consulté à l'adresse <http://www.alvarestech.com/temp/PDP2011/CDAndrea/MODULARIDADE/MILLER%202005.pdf>
- Miller, T.D., Elgard, P., 1998. Defining modules, modularity and modularization. In *Proceedings of the 13th IPS Research Seminar, Fuglsoe*. Consulté à l'adresse <http://www.alvarestech.com/temp/PDP2011/CDAndrea/MODULARIDADE/MILLER%202005.pdf>
- Mtopi Fotso, B. E., 2006. *Contribution à une méthodologie de conception modulaire: modélisation de la diversité dans les familles de produits*. Thèse de Doctorat de Université de Franche-Comté.
- Nepal, B., Monplaisir, L., Famuyiwa, O., 2012. Matching product architecture with supply chain design. *European Journal of Operational Research*, 216(2), 312–325.
- Niranjan, T.T., Wagner, S.M., Aggarwal, V., 2011. Measuring information distortion in real-world supply chains. *International Journal of Production Research*, 49(11): 3343 – 3362.
- Olsen, K.A., Saetre, P., 1997. Managing Product Variability by Virtual Products. *International Journal of Production Research* 35 (8): 2093–2108.
- Olsen, K.A., Saetre, P., Thorstenson, A., 1997. A procedure oriented generic Bill of Materials. *Computers & Industrial Engineering*, 32(1): 29-45.
- Orlicky, J.A., Plossl, G.W., Wight, O.W., 1972. Structuring the Bill of Material for MRP. *Production and Inventory Management Journal*, 24.
- Pahl, G., Beitz, W., 1996. Engineering Design, ed. *KM Wallace Design Council, London*.

- Pendremenos, J., Paralikas, J., Salonitis, K., Chryssolouris, G., 2009. Modularity concepts for automotive industry : A critical review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 1, pp. 148-152.
- Perera, H.S.C., Nagarur, N., Tabucanon, M.T., 1999. Component Part Standardization: A Way to Reduce the Life-Cycle Costs of Products. *International Journal of Production Economics* 60–61 (April): 109–16. doi:10.1016/S0925-5273(98)00179-0.
- Pil, F.K., Cohen, S.K., 2006. Modularity: implications for imitation, innovation, and sustained advantage. *Academy of Management Review*, 31(4), 995–1011.
- Pil, F.K., Holweg, M., 2004. Linking Product Variety to Order-Fulfillment Strategies. *Interfaces*, 35(5): 394 - 403.
- Pine, B.J., 1993. Mass Customization: The New Frontier in Business Competition. *Boston MA: Harvard Business Press*. ISBN-13: 978-0875843728
- Piran, F.A.S., Lacerda, D.P., Antunes Jr, J.A.V., Viero, C.F., Dresch, A., 2015. Modularization strategy: analysis of published articles on production and operations management (1999 to 2013). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1–13.
- Rai, R., Allada, V., 2003. Modular product family design: agent-based Pareto-optimization and quality loss function-based post-optimal analysis. *International Journal of Production Research*, 41(17), 4075–4098.
- Ramachandran, K., Krishnan, V., 2008. Design architecture and introduction timing for rapidly improving industrial products. *Manufacturing & Service Operations Management*, 10(1), 149–171.
- Ramalho, J.R., Santana, M.A., 2002. VW's modular system and workers' organization in Resende, Brazil. *International Journal of Urban and Regional Research*, 26(4), 756–766.
- Renard, C., See http://fr.wikipedia.org/wiki/Charles_Renard and the standards ISO 3-1973, ISO 17-1973, SO 497-1973 and ANSI Z17.1-1973.
- Robertson, D., Ulrich, K.T., 1998. Platform product development. *Sloan management review*, 39(4), 19–31.
- Romanos, M.S., 1989. Demand forecasting for parts used in modular products; a case study. *Engineering Costs and Production Economics*, 17: 231-244.

- Rusk, P.S., Barber, K.D., 1989. Structuring the Bills of Material for a Complex Make-to-Order Product (A Case Study). *Engineering Costs and Production Economics* 15: 215–22.
- Rutenberg, D.P., 1971. Design Commonality to Reduce Multi-Item Inventory: Optimal Depth of a Product Line. *Operations Research* 19 (2): 491–509.
- Sako, M., Murray, F., 1999. Modular strategies in cars and computers. *Financial Times*, 6 December.
- Sali, M., 2012. Exploitation de la demande prévisionnelle pour le pilotage des flux amont d'une chaîne logistique dédiée à la production de masse de produits fortement diversifiés. *Thèse en sciences de gestion, l'Université Paris-Dauphine*.
- Sali, M., Giard, V., 2015. Monitoring the production of a supply chain with a revisited MRP approach. *Production Planning & Control*, 26(10): 769-785.
- Salvador, F., 2007. Toward a product system modularity construct: literature review and reconceptualization. *Engineering Management, IEEE Transactions on*, 54(2), 219–240.
- Salvador, F., Forza C., Rungtusanatham, M., 2002. Modularity, product variety, production volume, and component sourcing: theorizing beyond generic prescriptions. *Journal of Operation Management* 20 (5):549-575
- Sanchez, R., 1996. Strategic product creation: managing new interactions of technology, markets, and organizations. *European Management Journal*. 14, pp. 121–138.
- Sanchez, R., 1999. Modular architectures in the marketing process. *The Journal of Marketing*, (63), 92–111.
- Sanchez, R., 2002. Using modularity to manage the interactions of technical and industrial design. *Design Management Journal*. 2, 8.
- Sanchez, R., Collins, R.P., 2001. Competing—and learning—in modular markets. *Long Range Planning*, 34(6), 645–667.
- Sanchez, R., Mahoney, J.T., 1996. Modularity, Flexibility, and Knowledge Management in Product and Organization Design. *Strategic Management Journal* 17 (S2): 63–76.
- Sanderson, S., Uzumeri, M., 1995. Managing product families: The case of the Sony Walkman. *Research Policy*, 24(5), 761-782. [http://doi.org/10.1016/0048-7333\(94\)00797-B](http://doi.org/10.1016/0048-7333(94)00797-B)

- Sanderson, S.W., 1991. Cost models for evaluating virtual design strategies in multicycle product families. *Journal of Engineering and Technology Management*, 8(3), 339–358.
- Sered, Y., Reich, Y., 2006. Standardization and Modularization Driven by Minimizing Overall Process Effort. *Computer-Aided Design* 38 (5): 405–16. doi:10.1016/j.cad.2005.11.005.
- Song, Z., Kusiak, A., 2010. Mining Pareto-optimal modules for delayed product differentiation. *European Journal of Operational Research*, 201(1), 123–128.
- Sosa, M.E., Eppinger, S.D., Rowles, C.M., 2004. The misalignment of product architecture and organizational structure in complex product development. *Management science*, 50(12), 1674–1689.
- Souilah, S., 2008. *Reengineering du pilotage des flux dans une relation client/fournisseur. Application au cas de l'industrie automobile*. Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale Paris.
- Stablein, T., Holweg, M., et Miemczyk, J., 2011. Theoretical versus actual product variety: how much customisation do customers really demand? *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 31, n° 3, p. 350-370.
- Starr, M.K., 1965. Modular production—a new concept. *Harvard business review*, 43(6), 131–142.
- Starr, M.K., 2010. Modular production—a 45-year-old concept. *International Journal of Operations & Production Management*, 30(1), 7–19.
- Stonebraker, P.W., 1996. Restructuring the bill of material for productivity: A strategic evaluation of product configuration. *International Journal of Production Economics* 45 (1-3): 251-260.
- Swaminathan, J.M., Tayur, S.R., 1998. Managing Broader Product Lines through Delayed Differentiation Using Vanilla Boxes. *Management Science* 44 (12-part-2): S161–72.
- Takeishi, A., Fujimoto, T., 2001. Modularisation in the auto industry: interlinked multiple hierarchies of product, production and supplier systems. *International Journal of Automotive Technology and Management*, 1(4), 379–396.
- Tallon, W.J., 1989. A Comparative Analysis of Master Production Scheduling Techniques for Assemble-To-Order Products. *Decision Sciences* 20 (3): 492–506.
- Tarondeau, J.-C., 1998. *Stratégie industrielle* (Seconde édition). Vuibert.

Trentin, A., Perin, E., Forza, C., 2014. Increasing the consumer-perceived benefits of a mass-customization experience through sales-configurator capabilities. *Computers in Industry*, vol. 65, n°4, p. 693-705.

Tu, Q., Vonderembse, M.A., Ragu-Nathan, T.S., Ragu-Nathan, B., 2004. Measuring modularity-based manufacturing practices and their impact on mass customization capability: a customer-driven perspective. *Decision Sciences*, 35(2), 147–168.

Ulrich, K.T., 1995. The Role of Product Architecture in the Manufacturing Firm. *Research Policy* 24 (3): 419–40.

Ulrich, K.T., Eppinger, S.D., 2000. *Product design and development* (fifth edition). McGraw-Hill International Edition.

van Veen, E.A., Wortmann, J.C., 1992. New developments in generative BOM processing systems. *Production, Planning & Control*, 3(3): 327-335.

Vollmann, T.E., Berry, W.L., Whybark, D.C., 1997. *Manufacturing planning and control systems*. 4th ed., New York: Irwin/McGraw-Hill.

Voss, C.A., 2007. Learning from the first Operations Management textbook. *Journal of Operations Management*, vol. 25, no 2, pp. 237-247.

Wilhelm, B., 1997. Platform and modular concepts at Volkswagen—their effects on the assembly process. In *Transforming automobile assembly* (p. 146–156).

Zhang, L. L., Vareilles, E., Aldanondo, M., 2013. Generic bill of functions, materials, and operations for SAP2 configuration. *International Journal of Production Research*, 51(2), 465-478. doi : 10.1080/00207543.2011.652745

Annexes

Contenu des Annexes

Annexe 1 : offre de thèse CIFRE

Annexe 1 : offre de thèse CIFRE

FICHE DE PROPOSITION DE SUJET POUR UNE CONVENTION CIFRE

Direction : Direction de la Supply Chain Monde

Service : Département de l'Organisation des Processus

Tuteur proposé : Bertrand SAGNET

TITRE : Impacts de la conception modulaire sur les processus de la Supply Chain

1- Thème de recherche (dans les grandes lignes ; si vous le souhaitez, vous pouvez joindre une explication complète en annexe)

Analyse de l'impact sur la Supply Chain de la mise en place de la conception modulaire & Amélioration de la prise en compte des pièces transverses dans la gestion des capacités

2- Argumentez l'intérêt du travail de recherche pour l'entreprise

Contexte :

- ♣ La gestion des capacités est critique pour Renault et la performance de la logistique amont.
- ♣ Renault souhaite mettre en place la conception modulaire pour des raisons d'optimisation des coûts et de diminution de la diversité pièces. La conception modulaire consiste à raisonner en groupements de pièces appelés modules, pouvant être montés sur différents véhicules. L'arrivée des modules va notamment augmenter le nombre de pièces transverses (pièces multi-sites et multi-modèles).

La conception modulaire va avoir des impacts sur de nombreux processus de la Supply Chain :

- ♣ Capacités long-terme (A+1, A+2), processus complexe et peu adapté aux pièces transverses
- ♣ Sécurisation des approvisionnements (capacités court terme) et de gestion des pénuries
- ♣ Capacité productive (Programmation) et gestion des contraintes
- ♣ Gestion des stocks

Des opportunités et risques ont été identifiés : simplification du suivi des stocks et des capacités fournisseurs, amélioration de la qualité de la programmation, amélioration des données transmises aux fournisseurs, mutualisation des stocks de pièces transverses, réorganisation des métiers autour des modules, dépendance accrue vis-à-vis des fournisseurs en cas de problèmes capacitaires, augmentation des problématiques liées aux à l'augmentation des approvisionnements lointains.

Le meilleur pilotage des capacités et des stocks est un facteur clé de succès dans la création de synergies, et est sources d'économies et de performance entre Renault, ses partenaires (Nissan, AvtoVaz ...) et ses fournisseurs.

3- Description des missions

- ♣ Etudes et benchmarks des industries avec ce type de problématique (par exemple VW, Ford, industrie aéronautique)
- ♣ Identification des impacts, opportunités et risques liés aux modules, notamment dans le domaine capacités
- ♣ Mise en place d'un processus de gestion des modules dans la gestion des capacités
- ♣ Etude des impacts sur les métiers concernés

Résumé

Le secteur automobile est aujourd'hui face au paradoxe de la personnalisation de masse. La diversité de produits finis est en augmentation perpétuelle du fait de la croissance de la personnalisation offerte au client. La diversité de composants à laquelle doivent faire face les Chaînes Logistiques résulte de cette diversité de produits finis à fabriquer. Même si le coût de la diversité reste difficilement mesurable, cette diversité a un impact majeur sur la performance économique des entreprises de production. Dans le secteur automobile, une grande partie de ces coûts est induite par le nombre très important de contraintes entre composants. De façon opérationnelle, ces contraintes rendent difficile la définition de nomenclature. Dans cette thèse, nous étudions une nouvelle façon de représenter la diversité. Aussi, pour limiter l'inflation de la diversité de composants à gérer, les fabricants doivent améliorer sans cesse leurs processus de conception et de production. L'usage d'une architecture modulaire des produits doit permettre de simplifier ces contraintes et donc la diversité de composants. Le succès de la mise en place d'une telle architecture dépend d'un certain nombre de conditions que nous étudions aussi dans cette thèse. Enfin, parce que la diversité de composants peut aussi résulter d'une vision locale des enjeux de diversité en phase de conception, cette thèse propose aussi une méthode de standardisation des modules et de leurs composants invisibles du client, basée sur une vision économique globale.

Mots Clés

personnalisation de masse, personnalisation de produits, gestion de la diversité, nomenclature, modularité, standardisation.

Abstract

Nowadays, the automotive sector faces the mass customization paradox. The end-product diversity is constantly increasing as the customer can customize more and more product features. The component variety that Supply Chains must deal with, results from the end-product variety to make. Though variety cost is hard to measure, variety has a great impact on the economic performance of today's manufacturers. In the automotive sector, a large portion of these costs are due to the great amount of constraints between components. On an operational point of view, these constraints lead to difficulties in the establishment of Bills of Materials. In this thesis, we define a new approach that describes the variety within Bills of Materials. In addition, in order to limit the inflation of component variety to manage, companies should improve continuously their design and manufacturing processes. The use of a modular architecture should allow to reduce the number of constraints between components and as a consequence, to reduce the component variety. The success of the application of such architecture depends on some prerequisites that we also focus on in this thesis. Finally, as component variety might result also from local interests in design phases, this thesis proposes also a model that aims at standardizing both modules and their components that is based on a global economic perspective.

Keywords

Mass customization, Product customization, Variety management, Bill of Materials, Modularity, Standardization.